GILBERTO JOÃO PAVANI
(ORGANIZADOR)

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING 2

Ano 2022

GILBERTO JOÃO PAVANI
(ORGANIZADOR)

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING 2

Ano 2022

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Bruno Oliveira
Camila Alves de Cremo
Daphynny Pamplona
Luiza Alves Batista
Natália Sandrini de Azevedo
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Collection: applied mechanical engineering 2

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Gilberto João Pavani

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied mechanical engineering 2 / Organizador Gilberto João Pavani. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-982-7
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.827222904

1. Mechanical engineering. I. Pavani, Gilberto João (Organizador). II. Título.

CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica aplica os princípios da engenharia, física e ciência dos materiais para a análise, projeto, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos como veículos, máquinas e ferramentas, requerendo a compreensão dos conceitos como automação, ciência dos materiais, cinemática, dinâmica, energia, mecânica dos fluidos, mecanismos, processos de fabricação, termodinâmica e vibrações com o auxílio de ferramentas computacionais para desenho e simulação.

A presente obra "Collection: Applied Mechanical Engineering 2" tem como objetivo a apresentação e a discussão de temas relevantes sobre a aplicação da engenharia mecânica na análise da influência dos parâmetros térmicos e estruturais da solidificação de ligas AA5052 na resistência à corrosão, análise termofluidodinâmica em trocadores de calor do tipo casco e tubo utilizando técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics ou dinâmica dos fluidos computacional), aparelho para exame de audiometria com Arduino, estudo de expressões matemáticas para a difusidade efetiva da água de cascas de maracujá durante a secagem, manutenção centrada em confiabilidade (RCM - Maintenance Focusing on Reliability) como estratégia para otimizar um plano de manutenção, simulação de superfícies de peças resultantes do fresamento de topo reto utilizando MATLAB ® e validação do método numérico utilizando os softwares Ansys ® e Matlab ®.

Portanto, esta obra apresenta grande potencial para contribuir com o entendimento dos temas apresentados, podendo servir como referência valiosa para novas pesquisas e estudos sobre as questões aqui discutidas.

Agradeço aos autores dos capítulos por suas valiosas contribuições e desejo aos leitores sucesso em seus futuros trabalhos de pesquisa sobre os temas apresentados nesta obra.

Gilberto João Pavani

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS E ESTRU-TURAIS DA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS AA5052 NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Vinícius Pereira da Silveira
Dielson Muniz Silva
Lanna Almeida Pereira
José Roberto Pereira Rodrigues
Fabio Alejandro Carvajal Florez
Jean Robert Pereira Rodrigues

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229041

CAPÍTULO 2 9

ANÁLISE TERMOFLUIDODINÂMICA EM TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CFD

Lucas Vinícius da Silva Azevedo
Francisco Augusto Aparecido Gomes
Jakeline Loureiro

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229042

CAPÍTULO 3 23

APARELHO PARA EXAME DE AUDIOMETRIA COM ARDUINO

Camila Baleiro Okado Tamashiro
Ricardo Costa Rossi
Gabriel Moisés de Camargo
João Pedro de Paiva da Silva
João Pedo Pereira

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229043

CAPÍTULO 4 29

ESTUDO DE EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA A DIFUSIVIDADE EFETIVA ÁGUA DE CASCAS DE MARACUJÁ DURANTE A SECAGEM

Êmyle Myrelle Alves dos Santos
Aluizio Freire da Silva Júnior
Amélia Ruth Nascimento Lima
Josefa Dayse Lima Silva
Maria Tereza Lucena Pereira
Vera Solange de Oliveira Farias
Célia Maria Rufino Franco
Jair Stefanini Pereira de Ataíde
Luis Eduardo Araújo Santos

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229044

CAPÍTULO 5 40

MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM) COMO ESTRATÉGIA PARA

OTIMIZAR UM PLANO DE MANUTENÇÃO

Esmeralda Hernandez Méndez

Miguel Ángel Rodríguez Lozada

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229045

CAPÍTULO 6..53

SIMULAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE PEÇAS RESULTANTES DO FRESAMENTO DE TOPO RETO UTILIZANDO MATLAB

Leon Yuhiti Mori Correa da Cunha

Milton Luiz Polli

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229046

CAPÍTULO 7..61

VALIDAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO UTILIZANDO OS SOFTWARES ANSYS® E MATLAB®

Marie Madeleine Sarzi Inácio

Rubens Gallo

https://doi.org/10.22533/at.ed.8272229047

SOBRE O ORGANIZADOR..68

ÍNDICE REMISSIVO...69

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS E ESTRU-TURAIS DA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS AA5052 NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Data de aceite: 01/04/2022

Vinícius Pereira da Silveira
Universidade Federal do Maranhão
São Luís – Maranhão

Dielson Muniz Silva
Universidade Federal do Maranhão
São Luís – Maranhão

Lanna Almeida Pereira
Universidade Federal do Maranhão
São Luís – Maranhão

José Roberto Pereira Rodrigues
Universidade Federal do Maranhão
São Luís – Maranhão

Fabio Alejandro Carvajal Florez
Universidade Federal do Maranhão
São Luís – Maranhão

Jean Robert Pereira Rodrigues
Universidade Estadual do Maranhão
São Luís – Maranhão

RESUMO: Diferentes morfologias macroestruturais e tamanhos de grãos desenvolvem-se devido a uma ampla gama de condições operacionais que podem existir durante a solidificação. Sabe-se que as propriedades mecânicas e resistência à corrosão têm-se mostrado fortemente dependentes da morfologia estrutural. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento eletroquímico da liga AA5052, contendo cerca de 3% de magnésio pelo seu interesse comercial solidificada de forma unidirecional. Este estudo foi realizado através de análises de curvas de polarização e testes de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), em solução de 0,5M de NaCl à 25°C. O lingote pode apresentar diferentes respostas à corrosão em diferentes partes, como função do arranjo micro estrutural. A taxa de corrosão e parâmetros de impedância são também discutidos.
PALAVRAS-CHAVE: Solidificação, alumínio, impedância, corrosão.

ABSTRACT: Different macrostructural morphologies and sizes of grains develop due to a wide range of operating conditions that may exist during solidification. It is known that the mechanical properties and corrosion resistance have been shown to be strongly dependent on the structural morphology. The objective of this study was to evaluate the electrochemical behavior of AA5052 alloy containing about 3% magnesium for its commercial interest unidirectional solidified. This study was conducted through analysis of polarization curves tests and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), in a solution of 0.5 M NaCl at 25 ° C. The casting can exhibit different responses in different parts of corrosion as a function of microstructural. The corrosion rate and impedance parameters are also discussed.
KEYWORDS: Solidification, aluminum, electrochemical, corrosion.

1 I INTRODUÇÃO

As ligas Al-Mg (série 5XXX) constituem um importante grupo de ligas de alumínio,

contendo de 0,8 a 5% de Mg (BRADY *et al*,1991*)*. As ligas dessa série possuem boa soldabilidade e boa resistência de corrosão em atmosferas marinhas. São classificados como ligas não tratáveis termicamente, mas são endurecidos por solução sólida e encruamento. Além desse ganho de resistência mecânica, o magnésio garantirá um maior endurecimento do metal (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983).

A macroestrutura de solidificação de peças fundidas ou lingotes pode apresentar-se na forma de grãos completamente colunares ou equiaxiais dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. Uma forma estrutural mais complexa, típica de solidificação em moldes de maiores difusividades de calor como moldes metálicos e refrigerados, é composta pelas duas zonas estruturais. Essa forma mista de solidificação ocorre quando os grãos equiaxiais encontram condições de nuclear e crescer no líquido, á frente da fronteira colunar de crescimento, provocando a transição colunar/equiaxial (CHALMERS; DOHERTY *et al*; FLEMINGS; OHNO; KURZ, FISHER, 1963,1977,1974,1970,1981).

Atualmente, lingotes com geometrias complexas são produzidos em larga escala e nesses casos o calor é extraído com orientação não preferencial. Nas regiões do lingote onde o crescimento dendrítico ocorre na direção a qual é similar a do vetor gravidade (crescimento para baixo) pode ocorrer uma inversão atenuada no perfil da macro segregação, uma vez que, o fluxo do soluto rico provocado pela contração da solidificação é oposto àquele causado pela ação da gravidade. Por outro lado, nas regiões onde prevalece o crescimento direcional para cima, a superfície será rica em soluto. Esse fenômeno requer uma análise global na composição da superfície do lingote que permite homogeneização e/ou melhora no comportamento corrosivo da superfície dos produtos de fundição (DOHERTY *et al*, 1977).

As morfologias macro e micro estruturais apresentam forte influência na resistência à corrosão. Recentemente, estudos mostraram os efeitos da macroestrutura de metais puros sobre as tendências de resistência à corrosão e também de microestruturas de ligas de alumínio. Verificou-se que a tendência de melhora da resistência à corrosão depende da taxa de resfriamento imposta durante a solidificação, que afeta no tamanho dos braços dendríticos, na redistribuição de soluto, e no comportamento eletroquímico do soluto e solvente dependendo de como são distribuídos (DOHERTY *et al*, 1977).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho foi utilizada a liga de Alumínio AA5052 (Al8Mg5), que foi preparada utilizando-se de metais comercialmente puros: Al (99,8%) e Mg (99,9%), cuja composição é apresentada pela análise química na Tabela 1.

Al	Mg	Fe	Si	Cr	Mn	Cu	OUTROS
95,510	3,091	0,593	0,383	0,242	0,142	0,038	0,001

Tabela 1: Composição Química Da Liga De Alumínio Aa5052.

A liga foi fundida no forno de resistência elétrica e então vazada no molde montado no dispositivo de solidificação unidirecional em diferentes temperaturas de superaquecimento. Neste experimento a liga foi vazada a 720°C acima da temperatura de fusão.

O dispositivo de solidificação unidirecional mostrado na figura 1 consiste basicamente de um forno tubular aquecido por 4 elementos tipo Globar de carbeto de silício, no qual é encaixada a casca cerâmica a base de zirconita de 280 mm de altura e 40 mm de diâmetro interno, sob a qual é acoplado o molde de cobre refrigerado a água. Este dispositivo foi projetado de tal modo que a extração de calor seja realizada somente pela parte inferior refrigerada a água, promovendo uma solidificação unidirecional vertical ascendente.

As variações de temperatura em função do tempo durante a solidificação, foram registradas em um sistema de aquisição de dados de 12 bits de resolução composto por duas placas de condicionamento, sendo uma para 16 termopares tipo K e outra para 16 termopares tipo S, com taxa de aquisição de 10 Hz por canal.

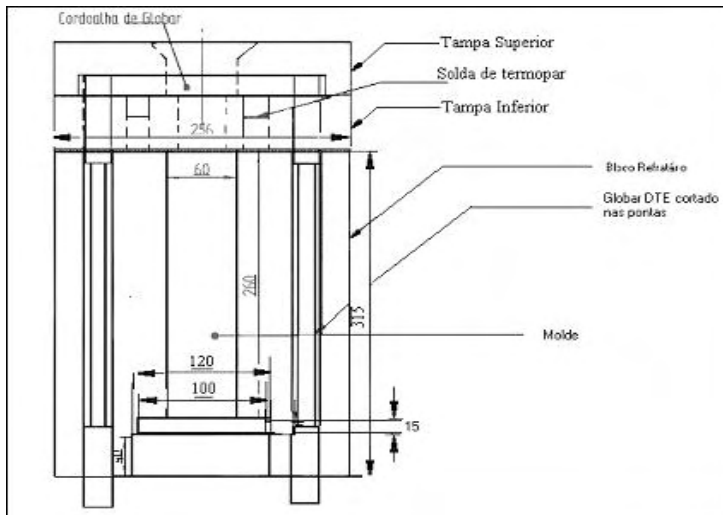



Figura 1: Dispositivo para solidificação unidirecional.

Foram utilizados 8 termopares tipo K (cromel/alumel), posicionados na casca cerâmica, desde a interface metal/molde e a cada 20 mm de distância, conectados ao sistema de aquisição de dados. Na figura 2 é mostrado em detalhe, um esquema da casca cerâmica com o molde de cobre refrigerado na parte inferior, bem como o posicionamento dos termopares.

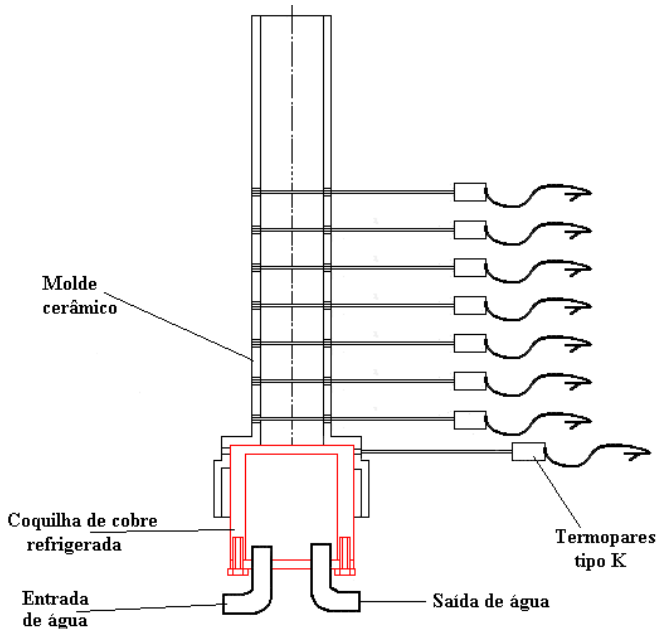



Figura 2: Esquema do aparato experimental utilizado.

Depois de desmoldado, o lingote obtido foi cortado na seção longitudinal. Em seguida a amostra foi lixada em lixadeira manual, usando lixas de carbetos de silício e óxido de alumínio. A sequência utilizada foi de grana: 100, 220, 320, 400 e 600, 800 e 1200. Para avaliar a macroestrutura, foi realizado um ataque na seção longitudinal para permitir o exame visual. Para o ataque das ligas de Al-Mg foi realizado um reagente constituído de: 20 ml de glicerina, 30 ml HCl, 2 ml de solução saturada em água de FeCl3, 7 gotas de HF e 1 ml de HNO3.

Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e testes de polarização foram realizados em triplicata utilizando-se das amostras coletadas ao longo do lingote Al5052 em 3 diferentes posições do metal em relação à superfície de resfriamento (inferior – P1 com 20mm da chapa-molde; centro – P2 com 85mm e superior – P3 com 130mm da chapa-molde). Os testes EIE foram realizados em solução de 0,5M de NaCl a 25°C em pH aproximadamente neutro (6,5). Um potenciostato (Autolab PGSTAT 12/30/320), uma célula de corrosão (em vidro Pirex) contendo contra eletrodo de platina, eletrodo de calomelano como eletrodo de referência e as amostras como eletrodo de trabalho foram usados para realizar os ensaios. As amostras (eletrodo de trabalho) foram posicionadas na célula de corrosão de forma que uma área circular de 1cm2 ficasse em contato com o eletrólito. A amplitude de potencial foi ajustada para 10mV em potencial de circuito aberto com amplitude de frequência ajustada de 100mHz até 100kHz (6 pontos por década). As amostras antes das medições foram lixadas (até 600 granas), e em seguida lavadas com

água destilada e secas em ar. Deram-se início às medições de EIE depois de 20 minutos com intuito de estabilização de potencial das amostras. Os testes de polarização também foram realizados em solução 0,5M de NaCl a 25°C utilizando um potenciostato. Esses testes foram conduzidos com uma taxa de varredura de 0,2 mV/s em uma faixa de potencial de circuito aberto entre -250mV (ESC) e +250mV (ESC). Usando um sistema automático de aquisição de dados, as curvas de polarização foram plotadas e taxas e potenciais de corrosão foram estimados pelo método de extrapolação Tafel.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 3 mostra as macroestruturas típicas da liga AA5052, onde os testes eletroquímicos foram realizados, podem ser observadas em três diferentes posições: próxima à base de refrigeração (P1), no meio (P2) e no topo do lingote (P3).

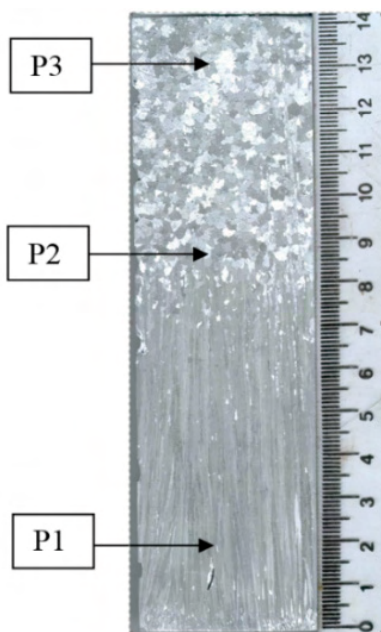



Figura 3: Macroestrutura de solidificação direcional para cima e posições selecionadas para os testes de corrosão.

A Figura 4 mostra as curvas de polarização das amostras solidificadas. Observa-se que a amostra em P1 (base) apresentou uma densidade de corrente catódica mais alta (mais nobre) que a amostra de alumínio puro, já os pontos P2 (centro) e P3 (topo) apresentaram um potencial de corrosão mais baixo (menos nobre) que a amostra de alumínio puro.

Apesar de apresentar um potencial de corrosão mais nobre, o P1 apresenta maior taxa de corrosão que o alumínio puro na solução de 0,5M de NaCl, isso indica que P1

é mais susceptível a ação corrosiva que o alumínio puro, entretanto, os pontos P2 e P3 apresentaram menor taxa de corrosão que o alumínio puro, sendo estes menos vulneráveis a ação corrosiva que o alumínio.

A maior resistência à corrosão observada para estruturas dendríticas mais grosseiras (zona equiaxial) da liga AA5052, parece estar associada à quantidade de alumínio nesta fase. A parte inferior do lin-gote é uma região relativamente rica em Mg (macro segregação) quando comparada com concentrações de soluto nas regiões que estão mais próximas ao topo do lingote. Maior taxa de resfriamento próximo à superfície de resfriamento do lingote, espaçamentos dendríticos mais finos e uma distribuição mais homogênea contribuem para a diminuição da resistência à corrosão para a liga de alumínio AA5052.

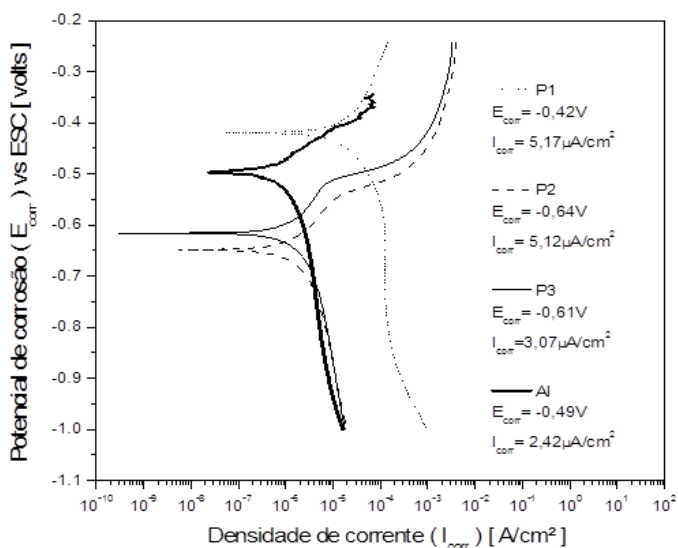



Figura 4: Curvas de polarização obtido para a amostras de alumínio puro e as três diferentes posições do lingote da liga AA5052 em solução 0,5M de NaCl a 25°C.

Ensaios de EIE e polarização foram realizados no intuito de analisar os efeitos do refino dendrítico (pela taxa de resfriamento) sobre a resistência à corrosão das amostras da liga AA5052. A Figura 5 mostra os resultados experimentais EIE em representação Bode e Bode-phase, respectivamente. Observa-se que tanto o módulo de impedância, quanto o ângulo de fase diminuem com o aumento da distância em relação à superfície refrigerada do lingote, porém observa-se que o ponto P2 possui o menor modulo de impedância e ângulo de fase. Sabe-se que maior módulo de impedância e maior ângulo de fase são indicativos de um comportamento eletroquímico mais nobre. Observa-se que a parte inferior do lingote (zona colunar) possui um comportamento eletroquímico mais nobre que pode ser explicado pela distribuição homogênea ao longo da microestrutura devido ao refino no arranjo interdendrítico.

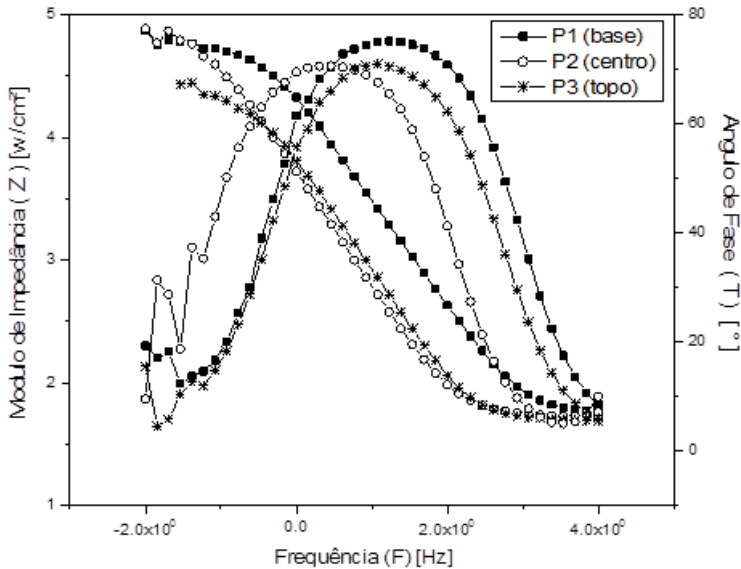



Figura 5: Representação dos resultados dos testes EIE em Bode e Bode-Phase para a Liga AA5052 em 0.5M de NaCl.

4 I CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tomadas para o presente trabalho:

O ponto P1 apresenta taxa de corrosão maior que o alumínio puro quando sujeitado ao teste de polarização em solução 0,5M de NaCl a 25°C e pH próximo a 6,5, sendo assim, mais susceptível à ação corrosiva que alumínio puro. Entretanto, os pontos P2 e P3 apresentaram menor taxa de corrosão que o alumínio puro, sendo estes menos vulneráveis à ação corrosiva que o alumínio.

Tanto o módulo de impedância, quanto o ângulo de fase diminuem com o aumento da distância em relação à superfície refrigerada do lingote, porém observa-se que o ponto P2 possui o menor modulo de impedância e ângulo de fase. O ponto P1 (zona colunar) possui um comportamento eletroquímico mais nobre que pode ser explicado pela distribuição homogênea ao longo da microestrutura devido ao refino no arranjo interdendrítico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pela FAPEMA (Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão, Brasil).

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS., **Metals Handbook**, 9.ed., United States of America, ASM International, 1983.

BRADY, GEORGE S., CLAUSER, HENRI H., **Materials Handbook**., 13ª ed., New York: Macgraw Hill, 1991.

CHALMERS, B. **The structure of ingots.** The Journal of the Australian Instute of Metals, v.8, p.255, 1963.

DOHERTY, R. D., COOPER, P. D., BRADBURY, M.H E HONEY, F. J., **On The Columnar-to Equiaxed Transition in Small ingots** – Metallurgical Transactions, v. 8A, p.397, 1977.

FLEMINGS, M.C., **Solidification processing**. 1st ed. New York, NY: Ed. McGraw-Hill, 364 p, 1974.

KURZ, W. AND FISHER J. **Dendrite growh at the limit of stability: Tip radius and spacing**. Acta Metallurgical, v.29, pp.11-20, 1981.

OHNO, A. **Formations mechanism of the equiaxed zone in ingots**. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, v.10,p459, 1970.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE TERMOFLUIDODINÂMICA EM TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CFD

Data de aceite: 01/04/2022
Data de submissão: 17/03/2022

Lucas Vinícius da Silva Azevedo
Universidade Técnologica Federal do Paraná (UTFPR)
Pato Branco – Paraná
http://lattes.cnpq.br/8339049359209653

Francisco Augusto Aparecido Gomes
Universidade Técnologica Federal do Paraná (UTFPR)
Pato Branco – Paraná
http://lattes.cnpq.br/4960562897145659
https://orcid.org/0000-0001-6204-1439

Jakeline Loureiro
Universidade Técnologica Federal do Paraná (UTFPR)
Pato Branco – Paraná
http://lattes.cnpq.br/9380307312701295

RESUMO: Trocadores de calor casco e tubos são amplamente utilizados em processos industriais, para as mais diversas funções envolvendo fluidos como aquecimento, resfriamento, evaporação. O presente trabalho visa a aplicação da dinâmica dos fluidos computacional – Computational Fluid Dynamics (CFD), através do *solver* de código fonte aberto *OpenFOAM,* para obtenção da solução do escoamento em contracorrente de um fluido newtoniano em um trocador de calor casco e tubos com variações geométricas. Desta forma, são descritas as etapas adotadas para o desenvolvimento do modelo computacional e por fim são mensurados e analisados parâmetros de eficiência para as diversas geometrias, sendo eles o coeficiente global de transferência de calor, a queda de pressão e os campos de velocidade e temperatura. Para as análises foram utilizados os modelos de turbulência k-epsilon e LES (*Large-Eddy Simulation*) via modelo de Smagorinsky.
PALAVRAS-CHAVE: TROCADOR DE CALOR, CFD, CASCO E TUBO, OpenFOAM.

THERMO-FLUID-DYNAMIC ANALYSIS IN SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER USING CFD TECHNIQUES

ABSTRACT: Shell and tube heat exchangers are largely used in industrial processes for the most diverse functions such as heating, cooling, evaporation and condensing of fluids. The present work aims the application of computational fluid dynamics (CFD) to obtain the solution of the countercurrent flow of a Newtonian fluid in a shell and tube heat exchanger with different geometries, which present variation in the number of baffles and in the shape of the inner tubes. Thus, the necessary steps for the development of the computational model are described and, finally, it is possible to measure and analyze efficiency parameters for the various geometries, like the global heat transfer coefficient, the pressure drop and the velocity and temperature. For the calculations, the k-epsilon turbulence models and the Smagorinsky model were implemented.
KEYWORDS: HEAT EXCHANGERS, CFD, SHELL AND TUBE, OpenFOAM.

1 I INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são dispositivos utilizados para a transferência de energia térmica entre dois ou mais fluidos que transitam em diferentes temperaturas, onde a troca térmica é realizada através de uma superfície sólida. Esses equipamentos são empregados nos mais variados campos, desde instalações industriais, em petroquímicas e usinas, ao uso residencial em eletrodomésticos.

Dentre os diversos tipos, os trocadores de calor de casco e tubos (TCCT) são os mais utilizados no ramo industrial devido a sua capacidade de trabalhar em diversas condições desde o vácuo à elevadas pressões, da criogenia à elevadas temperaturas. Dessa forma é possível produzi-lo de forma personalizada levando em conta as características de pressão e temperatura de cada fluído, possuindo limitação apenas quanto ao material de construção que suporte essas características.

Para a fabricação, existem diversos métodos analíticos para determinação de parâmetros de eficiência do TCCT, como por exemplo a efetividade-nut (ε–NUT). Porém ao lidar com geometrias mais complexas, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) torna-se uma ferramenta muito eficiente tanto pela obtenção desses parâmetros como para uma análise mais aprofundada dos fenômenos de escoamento e troca de calor nesses dispositivos. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a modelagem numérica e simulação do TCCT considerando variações em sua geometria. Para isso utilizou-se o método de Volumes Finitos através do software *OpenFOAM* e dois modelos de turbulência, k-epsilon e LES, para realizar comparação entre os resultados, assim como, analisar a influência da turbulência no processo de arrefecimento no TCCT.

2 I METODOLOGIA

2.1 Modelagem Matemática

A abordagem CFD é fundamentada a partir das equações que modelam o problema físico a partir da mecânica dos fluidos e da transferência de calor, que juntas descrevem os fenômenos físicos de um fluído, considerando o sistema contínuo. Logo para a resolução de problemas via CFD é necessário considerar as seguintes equações: Equação da Continuidade, equação da Quantidade de Movimento e a Equação da Conservação de Energia.

2.1.1 Equação da Continuidade

Para um fluído incompressível a equação da continuidade toma a seguinte forma (Eq. 2):

$$\nabla \cdot (\vec{U}) = 0 \tag{1}$$

2.1.2 Equação da Quantidade de Movimento

A segunda lei de Newton define que a variação da taxa de quantidade de movimento em um volume de fluído é resultante das somas das forças atuantes neste. Forças essas que podem ser campo, como a gravidade, forças de empuxo e forças de superfícies. Caso nenhuma dessas atue diretamente sobre o volume, a quantidade de movimento é conservada. Considerando escoamento incompressível para um fluido newtoniano, onde a taxa de deformação é formulada a partir da viscosidade, pode-se reescrever as equações na seguinte forma:

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right) = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V \qquad (2)$$

2.1.3 Equação da Conservação de Energia

Da mesma forma que as equações anteriores, a equação da conservação de energia é formulada por meio de um balanço entre o calor adicionado ao sistema e trabalho realizado resultando na variação da energia interna para um volume de controle. Advindo de manipulações matemáticas, podemos inferir a equação da energia segundo a Eq. 3, considerando escoamento sem geração de energia interna:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{U} h\right) = \nabla \cdot \left(\lambda \vec{\nabla} T\right) - p \nabla \vec{U} + \vec{\Phi} \qquad (3)$$

onde: h, T e λ são a entalpia estática, a temperatura e a condutividade térmica do fluido respectivamente e Φ é o termo de dissipação viscosa, que modela o aquecimento interno por viscosidade no escoamento, geralmente é desprezado maioria dos casos.

Em regime permanente e desprezando a dissipação viscosa, a Eq. 9 pode ser escrita como:

$$\nabla \cdot \left(\rho \vec{U} h\right) = \nabla \cdot \left(\lambda \vec{\nabla} T\right) - p \nabla \vec{U} \qquad (4)$$

Para o domínio sólido a Equação da energia pode ser escrita como:

$$\frac{\partial(\rho_s h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_s \overrightarrow{U_s} h_s\right) = \nabla \cdot \left(\lambda_s \vec{\nabla} T_s\right) \qquad (5)$$

Tal que o subscrito “s”, representa as mesmas grandezas indicadas na eq. 9, porém para o domínio sólido.

Em regime permanente e condutividade térmica constante, a eq. 5 se reduz para:

$$\nabla^2 T_s = 0 \qquad (6)$$

2.2 Modelagem Numérica

Nesta seção serão apresentados os modelos numéricos utilizados e a abordagem quanto a modelagem da turbulência.

2.2.1 Método de Volumes Finitos

A resolução das equações diferencias parciais apresentadas previamente apresentam uma grande dificuldade de resolução de forma analítica, uma vez que essas acabam por resultar em um sistema de equações acopladas. Portanto no presente trabalho utilizou-se o Método de volumes, que consiste da aproximação das equações diferenciais através de sistema de equações algébricas.

2.2.2 Malha Computacional

A discretização espacial consiste na divisão de um domínio físico contínuo em pequenos volumes, onde as equações de Navier-Stokes serão resolvidas através de aproximações numéricas. As informações topológicas da malha e características dos volumes de controle como posições de vértices, nós, centroides, número de faces, dentre outras, são necessárias e possuem grande influência sobre a solução das equações no modelo computacional. As malhas utilizadas no presente trabalho são do tipo não-estruturada, pois permitem elementos de diferentes formatos e um grande grau de refino em regiões de interesse, como será verificado nas próximas seções.

2.2.3 Turbulência

Devido a importância de se promover ou evitar o fenômeno da turbulência na elaboração de projetos, pesquisas têm sido realizada de modo a implementar cada vez modelos numéricos mais precisos e acessíveis, computacionalmente falando.

No presente trabalho, foram utilizados os seguintes modelos de turbulência: *k-ε,* que utiliza a abordagem RANS e foi implementado em todos os casos que serão citados posteriormente, e o modelo de Smagorisnky, que opera sob a abordagem LES, desta forma demandando mais esforço computacional, sendo aplicado apenas em 2 casos que obtiveram os maiores valores do coeficiente global de transferência de calor, para que desse modo pudesse ser feita a comparação com o modelo *k-ε.*

No modelo RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) são tomadas as médias das variáveis do escoamento, desprezando suas flutuações, dessa forma este modelo é mais acessível computacionalmente falando e o mais utilizado no mundo industrial. Enquanto na modelagem LES (*Large eddy simulation) uma filtragem espacial é utilizada para separar os vórtices de maior e menor escala. Neste modelo* as demandas de recurso computacional de armazenamento e volume de cálculos são grandes, porém essa técnica tem demonstrado grande potencial à medida que o poder de processamento computacional vem aumentando

e se tornando mais acessível.

3 I SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

No presente trabalho, devido ao custo elevado para obtenção de ferramentas de CFD comerciais e a falta de transparência para verificação do código e rotinas implementadas nestes, optou-se pela utilização do *OpenFOAM*, já que é um software de código aberto amplamente utilizado, se tornando alvo de bastante interesse da comunidade acadêmica. O *OpenFOAM* é um instrumento robusto gratuito para análise CFD, baseada em uma biblioteca escrito em C++, capaz de resolver as mais diversas gamas de escoamento, contando com solver de escoamentos compressíveis, incompressíveis, reativos, dentre outros. E também, conta com ferramentas para geração de malha e pós-processamento.

3.1 Pré-Processamento

Nessa primeira etapa o problema foi definido através da especificação da geometria, geração da malha e definição das condições de contorno da simulação.

Seguindo este cronograma, primeiramente uma geometria base foi definida, sendo ela o caso 1 (tubo circular e sem chicanas). Para essa geometria foram geradas 3 malhas. Dessa forma, a partir das 3 malhas realizou-se uma análise de convergência acompanhando a temperatura média em cada região ao longo das interações e a com essa investigação, os mesmos parâmetros foram utilizados para a geração das malhas das diferentes geometrias, que possuíam variação quanto ao número de chicanas e a geometria dos tubos internos.

Na tabela 1 estão os parâmetros geométricos gerais, de modo que, para cada tipo de tubo interno simulou-se o caso com 0, 2 e 3 chicanas, na tabela 2 estão as características referentes as regiões e matérias, na tabela 3 estão as condições de entrada adotadas para todos os casos e na figura 4, estão dispostas as regiões sólidas para o caso padrão e as demais variações de geometria.

Parâmetros gerais	Valor (mm)
Comprimento total do casco	166,00
Diâmetro casco	80,00
Diâmetros de entrada e saída do casco	16,00
Diâmetros entrada e saida do tubo	16,00
Número de tubos	6,00
Variações de geometria	**Valor (mm)**
Tubos circulares (Diâmetros Interno - Externo)	12,00 - 20,00
Tubos quadrados (Diâmetros Interno - Externo)	10,65 - 17,75

Tabela 1 - Parâmetros gerais para todos os casos e variações referente ao tubo interno.

Fonte: Autor.

	Casco	Tubo	Sólido
	(Água)	**(Água)**	**(Alumínio)**
Viscosidade [μ] (N/m². s)	9,59E-04	9,59E-04	------
Massa específica [ρ] (kg/m³)	1000	1000	2700
Calor Específico [Cp] (J/ (kg.K))	4181	4181	900
Condutividade térmica [k] (W/m.K)	0,606	0,606	200

Tabela 2 - Propriedades dos materiais (adaptado).

Fonte: (ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

Condições de Entrada	
T entrada Casco [K]	600
T entrada Tubo [K]	300
Vazão Casco [kg/s]	0,05
Vazão Tubo [kg/s]	0,05

Tabela 3 - Condições de entrada.

Fonte: Autor.

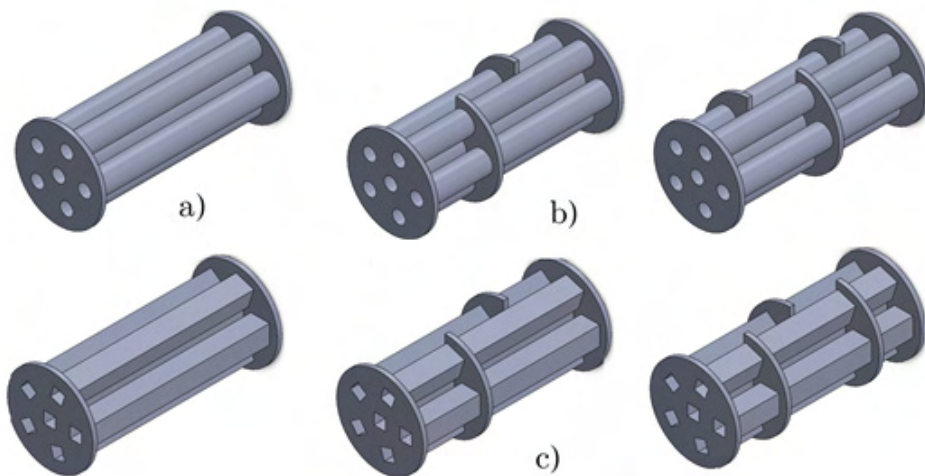



Figura 4 - Variações nas geometrias. a) Caso Padrão, b) variações do padrão com 2 e 3 chicanas, c) Tubos internos quadrados com 0, 2 e 3 chicanas respectivamente.

Fonte: Autor.

3.2 Processamento

Definidas as condições de contorno, de entrada e geradas as malhas, foram realizadas as simulações. O MVF foi implementado utilizando o solver chtMultiRegionFoam, disponível no conjunto base do *OpenFOAM*.

Foram executadas 6 simulações com o modelo k-ε e 2 com o modelo de LES -Smagorinsky, sendo essas duas, as que anteriormente com o modelo k-ε apresentaram

os maiores valores do coeficiente global de transferência de cal*or para comparação dos dois modelos.*

3.3 Pós-Processamento

Nessa etapa foram obtidos os campos de temperatura e velocidade de cada simulação e é possível estimar os valores de queda de pressão e coeficiente global de transferência de calor. O coeficiente global de transferência de calor (U) foi calculado utilizando o método das diferenças de temperaturas médias logarítmicas (LMTD) [3].

$$U = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{LMTD} A_{ht}} \tag{7}$$

Tal que: Q é a taxa total de transferência de calor e pode ser extraída da simulação, juntamente com as temperaturas de saída de cada região (casco e tubo) e Aht é a área efetiva de troca de calor, que nesse caso foi considerada a média entre as áreas internas e externas da região sólida, de modo que as áreas foram dimensionadas para que a as geometrias com tubos internos circulares e quadrados tenham áreas transversais similares.

A variação de temperatura logarítmica para esse caso (fluxo contracorrente) pode ser definida a partir das seguintes equações:

$$\Delta T_1 = Tq_1 - Tf_2 \tag{8}$$

$$\Delta T_2 = Tq_2 - Tf_1 \tag{9}$$

Onde T_q e T_f se referem a temperatura fluido quente e frio, respectivamente e os subíndices 1 e 2, correspondem à entrada e saída. Definindo:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \tag{10}$$

Juntamente nesse processo foi possível verificar a queda de pressão, avaliada para todos os casos na região casco, verificando as diferenças entre a pressão de entrada e saída.

4 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Geração de malha e convergência

Para a convergência, comparou-se o resultado das 3 malhas geradas para o caso padrão, que apresentam uma razão média de crescimento 2 em relação ao número de elementos total, com suas características estão dispostas na tabela 4. Pode-se observar no gráfico, que dispõem a temperatura média em cada região em função das iterações (figura 5). Analisando os resultados, é possível visualizar que as malhas 2 e 3 tendem a ter resultados similares.

Malha	Número de elementos em cada região		
	Tubo	Sólido	Casco
1	159720	218498	185668
2	409296	279580	640766
3	586348	460804	901828

Tabela 4 - Características das malhas do caso padrão.

Fonte: Autor.

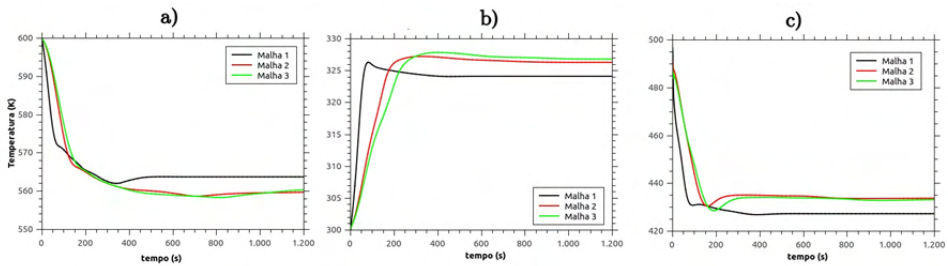



Figura 5 - Gráficos de convergência: Temperaturas médias nas regiões x Número de interações. a) Região Casco, b) Região Tubo, c) Região Sólido.

Fonte: Autor.

Deste modo, optou-se pela malha 3, que possui maior refino, com isso, seus parâmetros foram utilizados para a geração das malhas dos casos posteriores. Tendo em mente que os fenômenos de interesse ocorrem próximo às paredes, como a transferência de calor, formação de camada limite e zonas de recirculação, então buscou-se realizar maior refino nessas regiões de modo que podemos observar esse aspecto na malha gerada para as diferentes geometrias (variação dos tubos internos) (figura 6).

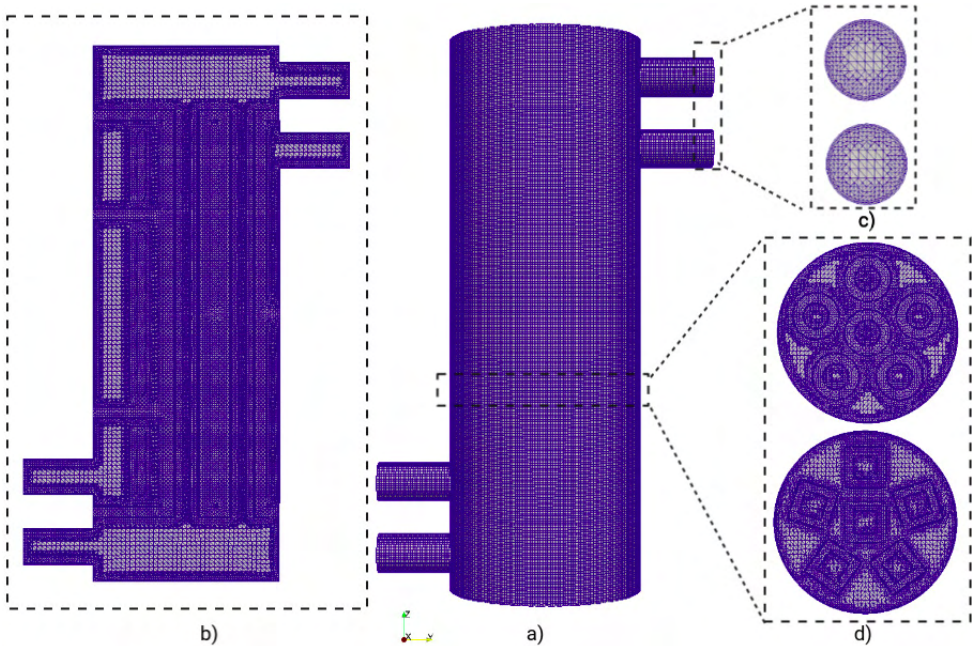



Figura 6 - Visão geral das malhas: a) Visão do TCCT, b) Vista longitudinal no eixo zy, c) seções de saída e entrada, respectivamente. d) Corte transversal no eixo zy para as variações de geometria com tubos redondos e quadrados, respectivamente.

Fonte: Autor.

4.2 Campos de temperatura e velocidade

Após implementadas todas as condições gerais e de contorno e rodar o solver previamente escolhido, é possível averiguar os fenômenos físicos que ocorrem internamente no TCCT, através dos campos de temperatura e velocidade.

Podemos observa-los para os casos que apresentaram maiores valores de transferência de calor: caso com três chicanas com tubo circular e caso com três chicanas e tubo quadrado.

Apenas estes casos serão ilustrados para que seja perceptível a diferença entre os modelos de turbulência implementados.

Nas figuras 7, 8, 9 e 10, podemos observar os campos referentes à velocidade e temperatura de cada caso citado, comparando os modelos de turbulência, é possível verificar que ambos possuem similares no que diz respeitos as distribuições gerais de temperatura e velocidade.

Observa-se que o modelo *k-ε* é capaz de trazer uma visão satisfatória sobre os fenômenos de escoamento no interior da geometria, entretanto o modelo de Smagorinksy, mesmo não trabalhando com um refino da malha, se mostrou mais satisfatório para resolver o escoamento de uma forma mais acurada no campo de velocidade, é possível observar

zonas com uma certa de queda de velocidade próximas as chicanas, evidenciando possíveis zonas de recirculação, entretanto quando se aborda os campos de temperatura, verifica-se que para ambos os modelos de turbulência, as soluções foram similares.

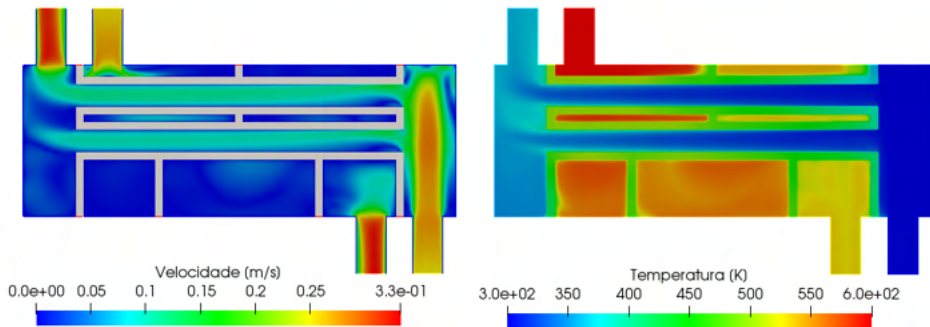



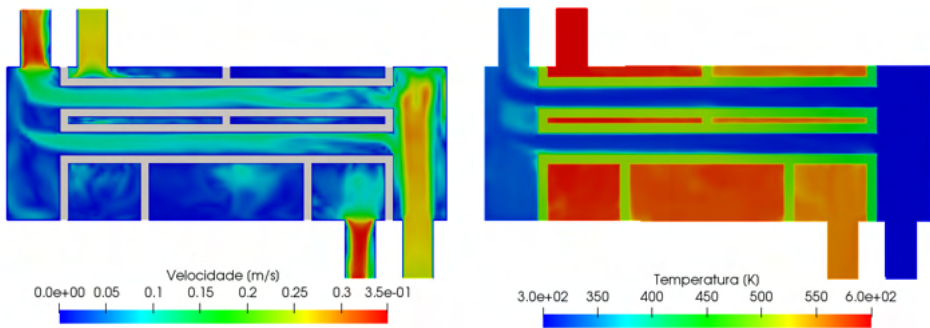
Figura 7 - Campos de velocidade e temperatura, respectivamente, para geometria com tubos internos circulares e 3 chicanas, com modelo RANS - *k-ε*.

Fonte: Autor.

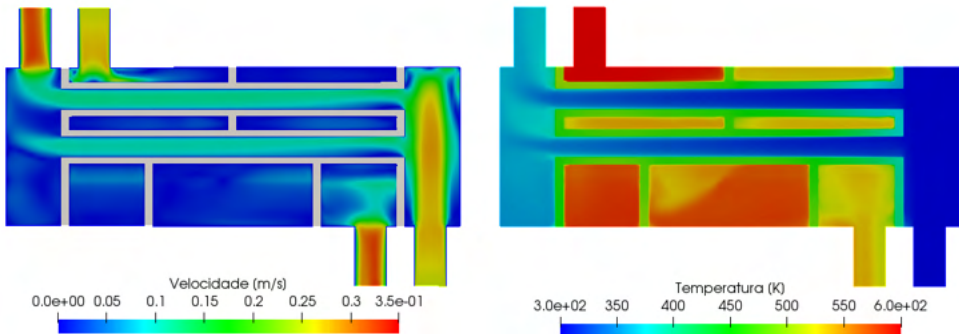
Figura 8 - Campos de velocidade e temperatura, respectivamente, para geometria com tubos internos circulares e 3 chicanas, com modelo LES - Smagorisnky.

Fonte: Autor.

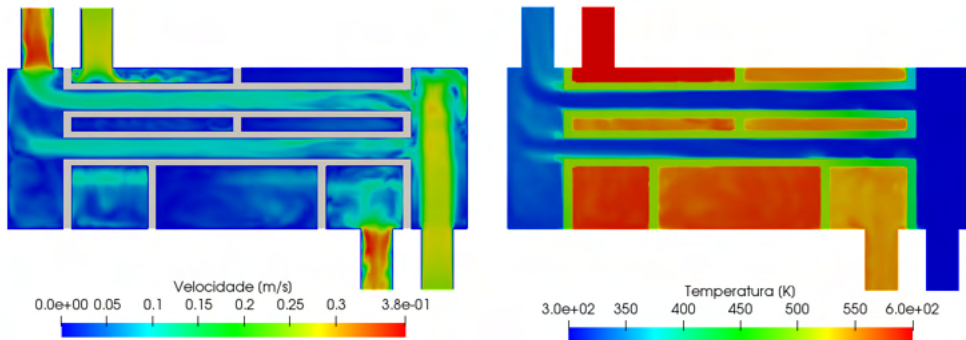
Figura 9 - Campos de velocidade e temperatura, respectivamente, para geometria com tubos internos quadrados e 3 chicanas, com modelo RANS - *k-ε*.

Fonte: Autor.

Figura 10 - Campos de velocidade e temperatura, respectivamente, para geometria com tubos internos circulares e 3 chicanas, com modelo LES – Smagorisnky.

Fonte: Autor.

Ainda para uma análise um pouco mais aprofundada, é possível verificar o campo vetorial de velocidades (figura 11), nele é possível localizar as zonas de recirculação, denotando essas de forma mais clara na simulação utilizando o modelo de LES - Smagorisnky, onde pode-se verificar próximo as paredes, no plano transformação, a formação de zonas de baixa de pressão responsáveis pela recirculação.

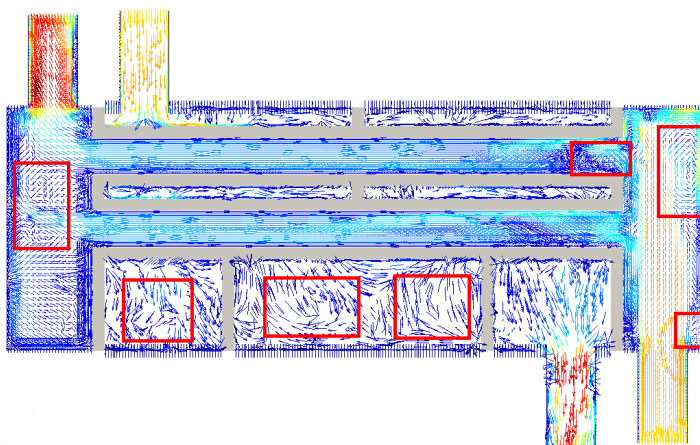



Figura 11 - Gradiente de velocidades com sinalização nas zonas de recirculação para o caso com três chicanas e tubo interno circular utilizando o modelo LES – Smagorisnky.

Fonte: Autor.

Essas zonas também podem ser observadas nos campos de velocidade anteriores. E também, outro fenômeno que pode ser de interesse, é o aumento de velocidade nas regiões de saída, devido à diminuição da área transversal.

4.3 Coeficiente global de transferência de calor e queda de pressão

A partir das simulações é possível verificar nos gráficos (Figura 11), as temperaturas de saída nas regiões tubo e casco, respectivamente, até o alcance da estabilidade no regime permanente.

Observando ambos os gráficos, é possível inferir que o modelo k-ε alcançou a estabilidade nas temperaturas de saída de ambas as regiões mais rapidamente e de forma mais suave, em contrapartida o modelo LES - Smagorisnky, levou mais tempo, enquanto demonstrava mais oscilações com aspecto “serrilhado” , isso pode ser explicado pelo fato da malha utilizada não ter sofrido mais refinos necessários para a implementação do modelo LES, haja vista que neste trabalho o modelo foi implementado apenas para quesito de comparação com o k-ε, sem uma abordagem mais profunda. Outro fato que corrobora para com essas oscilações é que o modelo LES é geralmente utilizado em condições transientes e esse caso foi tratado como regime permanente, levando a grandes variações iniciais que podem ser observadas nos gráficos.

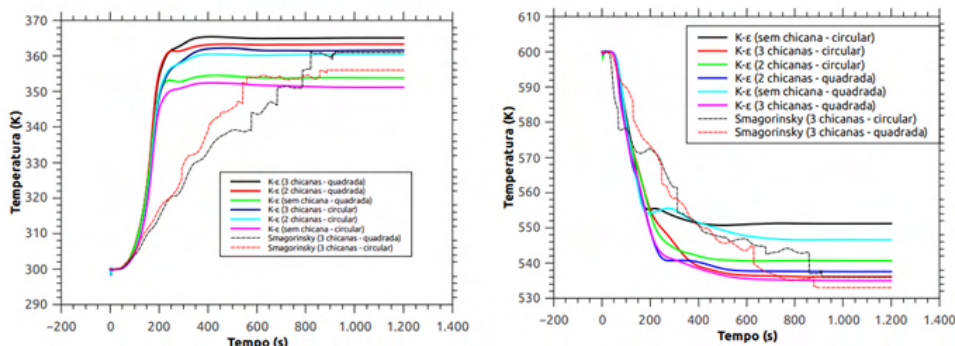



Figura 11 - Gráfico da temperatura de saída na região Tubo (fluído frio) e Casco (fluido quente), respectivamente.

Fonte: Autor.

Continuando a análise, após as simulações, é possível extrair os valores de temperatura, taxa de transferência de calor e os valores de queda de pressão, que foram mensurados levando-se em conta as diferenças de pressão na entrada e saída da região do casco (parte externa dos tubos).

Extraindo esses parâmetros de cada caso (figura 4) é possível determinar o coeficiente global de transferência de calor para cada um deles (quadro 1).

Modelo	Caso	Saída Tubo [K]	Saída Casco [K]	ΔT log [K]	Qtotal [W]	U [W/m²K]	ΔP [Pa]
k-ε (RANS)	Circular sem chicanas	351,16	551,19	250,01	10723,8	761,87	77,13
k-ε (RANS)	Circular com 2 chicanas	360,47	540,67	240,1	12640,31	935,1	81,95
k-ε (RANS)	Circula com 3 chicanas	361,58	536,11	237,26	13227,32	990,22	89,85
k-ε (RANS)	Quadrado sem chicanas	353,8	546,56	237,12	11142,23	834,64	81,34
k-ε (RANS)	Quadrado com 2 chicanas	363,32	537,56	237,13	13235,93	991,48	95,93
k-ε (RANS)	Quadrado com 3 chicanas	366,9	534,99	234,05	13812,2	1048,22	103,4
Smagorisnky (LES)	Circular com 3 chicanas	356,46	536,16	239,83	12924,97	957,24	75,65
Smagorisnky (LES)	Quadrado com 3 chicanas	362,94	533,66	235,36	13520,74	1020,39	88,92

Quadro 1 – Valores definidos através de simulação numérica.

5 I CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a modelagem e simulação de um TCCT, variando sua geometria de forma a obter melhores parâmetros de eficiência através da abordagem CFD.

Diante do que foi proposto, é observado que a ferramenta CFD é altamente eficiente, porém quando utilizada de forma responsável, haja vista que tem potencial para resolução de mecânicas fluidos e transferência de calor complexos. Neste caso, a solução foi obtida através do método dos volumes finitos, através do *solver OpenFOAM*, que se mostra uma ferramenta robusta para problemas de dinâmicas de fluidos computacional.

Quanto aos dados obtidos, observou-se que ao aumentar o número de chicanas, o coeficiente de transferência de calor global sofreu um aumento, otimizando o dispositivo. Entretanto da mesma forma a perda de carga também se amplificou, desta forma para um projeto real, estes parâmetros devem ser levados em consideração para que haja um equilíbrio entre esses pontos.

Referente aos modelos de turbulência, observa-se que o k-ε é capaz de realizar de forma satisfatória a solução para esses casos. Contudo, o modelo LES - Smagorisnky é capaz de resolver o problema explicitando as regiões mais complexas do escoamento com maior acurácia. Como é observado no campo de velocidade, evidenciando de forma mais precisa as zonas de recirculação próximas às paredes.

REFERÊNCIAS

BLAZEK, J. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. Elsevier, 2005. (Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications). ISBN 9781483299648.

ÇENGEL, A. YUNGUS.; GHAJAR, J. AFSHIN. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications**. 4. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011

FERZIGER, J.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer Berlin Heidelberg, 2002

INCROPERA, FRANK P; DEWITT, DAVID P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 4. ed. LTC Editora, 2008

KUPPAN, THULUKKANAM. **Heat exchanger design handbook**. 2. ed. New York: CRC Press, 2000.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC. 2ª edição. 2004.

OPENCFD. **User Guide**: Chapter 1 Introduction. 2021. Disponível em: https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/1-introduction Acesso em: 15 set. 2021.

CAPÍTULO 3

APARELHO PARA EXAME DE AUDIOMETRIA COM ARDUINO

Data de aceite: 01/04/2022

Camila Baleiro Okado Tamashiro
Etec Profª Marines Teodoro De Freitas Almeida
Novo Horizonte – SP

Ricardo Costa Rossi
Etec Profª Marines Teodoro De Freitas Almeida
Novo Horizonte – SP

Gabriel Moisés de Camargo
Etec Profª Marines Teodoro De Freitas Almeida
Novo Horizonte – SP

João Pedro de Paiva da Silva
Etec Profª Marines Teodoro De Freitas Almeida
Novo Horizonte – SP

João Pedo Pereira
Etec Profª Marines Teodoro De Freitas Almeida
Novo Horizonte – SP

RESUMO: O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um aparelho de audiometria com medidor de potência e frequência para diagnóstico de perda de audição. Para sua constituição foi utilizado componentes de arduino, linguagem de programação C++ e conhecimentos práticos em robótica, motivados a partir de pesquisas e entrevistas com médico da área e projetos já existentes nessa área, como diversos aplicativos para celular gratuitos e licenciados. A partir da metodologia utilizada, o projeto atendeu as expectativas dos entrevistados e permite uma alternativa paralela e menos custosa que um aparelho de audiometria calibrado para exames iniciais de diagnóstico de perda de audição.

PALAVRAS-CHAVE: Robótica, Educação, Saúde, Arduino.

ABSTRACT: The present work presents the development of a prototype of an audiometry device with power and frequency meter for diagnosis of hearing loss. Arduino components, C ++ programming language and practical knowledge in robotics, motivated by researches and interviews with area doctors and projects already existent in this area, such as several free and licensed mobile applications, were used for its constitution. Based on the methodology used, the project met the expectations of the interviewees and allows a parallel and less expensive alternative than a calibrated audiometry device for initial diagnostic tests for hearing loss.

KEYWORDS: Robotics, Education, Health, Arduino.

1 I INTRODUÇÃO

Este trabalho buscou desenvolver o protótipo de um aparelho de audiometria, que é um exame realizado para detectar o grau e o tipo de perda auditiva de uma pessoa a partir de um baixo custo e fácil locomoção, o método de desenvolvimento empregado foi a plataforma Arduino, devido a praticidade e simplicidade, e também por possui inúmeras aplicações nas mais diversas áreas. Para isso, foi realizada pesquisa de levantamento bibliográfico sobre o funcionamento do exame, seus parâmetros

e também o orçamento destinado à área da saúde no Brasil, que, segundo pesquisas realizadas em 2018 o percentual fica bem abaixo da média mundial, de 11,7% de acordo com o sugerido pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Essa taxa é bem menor que a média no continente africano (9,9%), nas Américas (13,6%) e na Europa (13,2%). Na Suíça, essa proporção é de 22%. De acordo com a Emenda Constitucional aprovada, pelos próximos vinte anos o congelamento dos gastos vai representar perda de R$ 743 bilhões para o SUS no período, segundo estudo do Ipea(2018). A partir desses dados, o buscou fez uma entrevista com um medico otorrinolaringologista sobre o exame de audiometria, calibragem, padronização e parâmetros utilizados. Ao término, verificou-se que o auto custo inviabiliza o diagnóstico na perda inicial da audição e se o protótipo desenvolvido ganhasse mercado pelo fato de ser de menor custo, auxiliaria a identificação de pessoas com perda de audição. Este artigo encontra-se organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta os objetivos do trabalho. A seção 3 descreve o trabalho proposto. A metodologia de trabalho é apresentada na seção 4. Os resultados são apresentados na seção 5, e as conclusões são apresentadas na seção 6.

2 | OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Facilitar a realização de exames, por meio de um aparelho utilizando a plataforma Arduino que informa os tipos e os níveis de perca auditiva dos pacientes, já que este aparelho pode ser levado a residência dos mesmos, tornando mais acessível a realização de exames de audiometria.

2.2 Objetivo específicos

Utilizar tecnologia embarcada de microcontroladores para abaixar o custo e tornar o projeto portátil: levar até o paciente.

3 | O TRABALHO PROPOSTO

O trabalho buscou desenvolver um protótipo com componentes de arduino, linguagem de programação e partes de máquinas caça-níqueis adquiridas em forma de doação entre um convênio firmado entre o Centro Paula Souza e o Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo em 2013 que permitiu que as Escolas Técnicas Estaduais (Etecs) e Faculdades de Tecnologia do Estado (Fatecs) recebam máquinas caça-níqueis apreendidas pela polícia para transformá-las em equipamentos de utilidade pública. A parceria envolveu 25 Etecs e 13 Fatecs com cursos em áreas em que o aproveitamento das peças pode ser feito pelos alunos. Para planejamento e desenvolvimento inicial foi necessário levantamento bibliográfico do setor quanto a orçamento destinado à saúde pública, como também

projetos similares ao protótipo como uso de técnicas de robótica e programação de arduino já utilizadas nas universidades federais Brasil. A partir do estudo e planejamento, deu-se o desenvolvimento se deu a partir da interligação e programação dos componentes de arduino, sendo distribuídos em fase de testes e posteriormente com conexão a fonte de alimentação da leitura de dados e exibição no programa - foi utilizado conhecimento em linguagem de programação C++ para eficiência do código e desenvolvimento do projeto.

4 I MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo foi desenvolvido a partir das utilizações de técnicas de pesquisa de levantamento bibliográfico e estudos de estatísticas do setor de saúde, deficientes auditivos, e pesquisas sobre o níveis de perda de audição e testes padrões para seu diagnóstico. Seu desenvolvimento deu-se por meio práticos a partir das aquisições de placa de arduino versão uno, reutilização de peças das máquinas caça-níqueis com codificação em linguagem de programação C++ no software do arduino versão 1.8.2. Foram realizados diversos testes, iniciando-se em testes para diagnóstico e verificação da necessidade de calibração do aparelho, leitura e diagnóstico dos dados obtidos. Posteriormente os testes realizados foram in loco com quarenta estudantes do curso técnico em informática integrado ao ensino médio, de ambos os sexos e alturas diferentes, com idades entre 17 e 18 anos.

5 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo atendeu seus objetivos de desenvolvimento de forma clara e positiva, nos testes preliminares foram identificadas correções quanto ao barulho e intensidade do som emitidos pelo buzzer. O prótipo encontra-se desenvolvido para ser ajustado aos processos industriais e devidamente registrado.

FIGURA 1: protótipo completo em funcionamento.

Fonte: Dos próprios autores (2018).

FIGURA 2: caixa principal do protótipo.

Fonte: Dos próprios autores (2018).

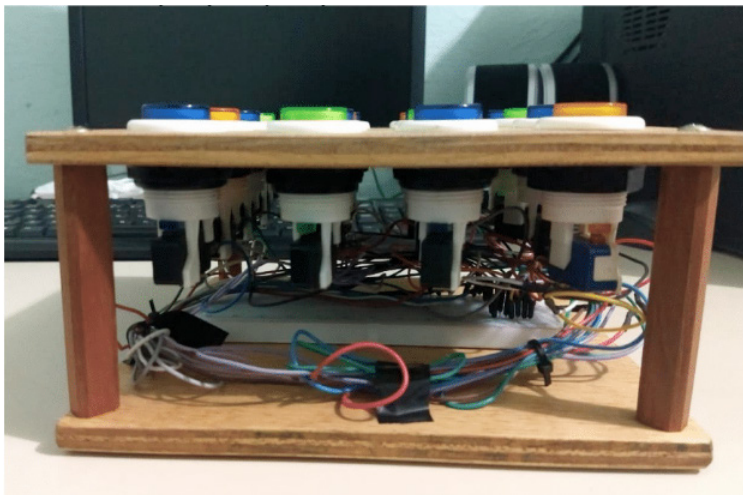



FIGURA 2: caixa principal do protótipo.

Fonte: Dos próprios autores (2018).

6 | CONCLUSÕES

O protótipo atendeu o planejamento inicial, tendo seus objetivos gerais e específicos atendidos, sendo que, para projetos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento da medição da potência e frequência e melhoria da padronização dos exames a baixo custo comparado às tecnologias existentes.

REFERÊNCIAS

FIGUEIREDO, Nebia M. Almeida. Método e Metodologia da Pesquisa Científica, 2. Ed. São Caetano do Sul: Yendis Editora, 2007.

MATIAS – PEREIRA, José, Manual de Metodologia da Pesquisa Científica, São Paulo: Atlas, 2007.

SOBRINHO, Wanderley Preite, Falta de médicos e de remédios: 10 grandes problemas da saúde brasileira, disponível em: <https://noticias.uol.com.br/saude/listas/falta-medico-e-dinheiro-10-grandes-problemas-da-saude-no-brasil.htm> Acesso em 12 de junho de 2018.

DIREITO DE OUVIR, O que é uma audiometria?, disponível em: <https://www.direitodeouvir.com.br/audiometria> Acesso em 12 de junho de 2018.

ARDUINO, Site Oficial da placa Arduino, disponível em: <http://playground.arduino.cc/Portugues/HomePage> Acesso em 13 de junho de 2018.

BAÚ DA ELETRÔNICA, Arduino Pro Micro, disponível em: <http://www.baudaeletronica.com.br/arduino-pro-micro-atmega32u4-5v.html> Acesso em 13 de junho de 2018.

ELETRÔNICA DIDÁTICA, Protoboard, disponível em: <http://www.eletronicadidatica.com.br/protoboard.html> Acesso em 13 de junho de 2018.

BIOSOM, Sobre o aplicativo Hearing Guardian, disponível em: <https://biosom.com.br/sobre-o-hearing-guardian> Acesso em 14 de junho de 2018.

APPLE, Siemens Hearing Test, disponível em: <https://itunes.apple.com/us/app/siemens-hearing-test/id394674665?mt=8> Acesso em 14 de junho de 2018.

RIBEIRO, Leandro, O que é UML e Diagramas de Caso de Uso: Introdução Prática à UML, disponível em: <https://www.devmedia.com.br/o-que-e-uml-e-diagramas-de-caso-de-uso-introducao-pratica-a-uml/23408> Acesso em 14 de junho de 2018.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA A DIFUSIVIDADE EFETIVA ÁGUA DE CASCAS DE MARACUJÁ DURANTE A SECAGEM

Data de aceite: 01/04/2022

Êmyle Myrelle Alves dos Santos
Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande
Cuité - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/5813805035805856

Aluizio Freire da Silva Júnior
Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande
Cuité - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/4720593438601826

Amélia Ruth Nascimento Lima
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Ceará
Fortaleza - Ceará
http://lattes.cnpq.br/8804163015012728

Josefa Dayse Lima Silva
Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande
Cuité - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/1368600327137175

Maria Tereza Lucena Pereira
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Ceará
Fortaleza - Ceará
http://lattes.cnpq.br/1101257330417991

Vera Solange de Oliveira Farias
Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande
Cuité - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/0923353123868517

Célia Maria Rufino Franco
Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande
Cuité - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/1728798138944094

Jair Stefanini Pereira de Ataíde
Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande
Cuité - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/3201374347373584

Luis Eduardo Araújo Santos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande - Paraíba
http://lattes.cnpq.br/4658267293374624

RESUMO: Este trabalho foi realizado com o objetivo de aplicar uma solução numérica para a equação de difusão (geometria de uma parede infinita) considerando a condição de contorno de terceiro tipo. Este modelo difusivo foi utilizado pretendendo encontrar a expressão mais adequada para a difusividade efetiva de água em função do teor de umidade local, para descrever o processo de secagem de cascas de maracujá. Os dados experimentais utilizados neste estudo foram obtidos através do projeto PIBIC/CNPq-UFCG (2019-2020), os quais referem-se à secagem de cascas de maracujá nas temperaturas de 60 e 70ºC. Com o intuito de identificar a melhor expressão para a difusividade efetiva de água, a solução numérica foi acoplada a um otimizador obtido através de

um método inverso. Com o *software Infinity Slab Numerical* foram realizadas otimizações para a determinação dos parâmetros do processo, e também os gráficos de contorno que simulam a distribuição de água no interior do produto. A partir dos resultados, observou-se que o modelo proposto descreve bem o processo de secagem de cascas de maracujá, principalmente quando foi utilizada a expressão exponencial para a difusividade.
PALAVRAS-CHAVE: Simulação, Modelos difusivos, Solução numérica, Método dos volumes finitos, Otimização.

STUDY OF MATHEMATICAL EXPRESSIONS FOR THE EFFECTIVE WATER DIFUSIVITY OF PASSION FRUIT PEELS DURING DRYING

ABSTRACT: This work was carried out with the objective of applying a numerical solution to the diffusion equation (geometry of an infinite slab) considering the boundary condition of the third kind. This diffusive model was used in order to find the most adequate expression for the effective water diffusivity as a function of the local moisture content to describe the drying process of passion fruit peels. The experimental data used in this study were obtained through the PIBIC/CNPq-UFCG project (2019-2020), which refer to the drying of passion fruit peels at temperatures of 60 and 70ºC. In order to identify the best expression for the effective water diffusivity, the numerical solution was coupled to an optimizer obtained through an inverse method. Through the Infinity Slab Numerical software, optimizations were carried out to determine the process parameters, as well as the contour graphics that simulate the distribution of water inside the product. From the results, it was observed that the proposed model describes well the drying process of passion fruit peels, especially when using the exponential expression for diffusivity.
KEYWORDS: Simulation, Diffusive models, Numerical solution, Finite volume method, Optimization.

1 I INTRODUÇÃO

Estudos relacionados ao uso de resíduos de frutas e hortaliças como alternativas para indústrias farmacêuticas e alimentícias têm sido uma tendência recente (ZHANG et al.,2018; GALAZ et al., 2017; NAYAK, PAL E SANTRA, 2015). Isto é devido ao fato de que esses resíduos representam uma parte considerável da massa desses alimentos, e que o descarte ainda é a prática mais comum. No entanto, estudos já publicados têm demonstrado que resíduos como cascas e sementes possuem características nutricionais importantes; além de serem matéria prima para a produção de polissacarídeos como amido, pectina, entre outros (OLIVEIRA et al., 2016; MADRUGA et al., 2014). As cascas de maracujá estão entre os resíduos com potencial econômico.

A casca de maracujá, por ser um resíduo de um fruto largamente comercializado, tem alto potencial econômico. Isso tem estimulado pesquisas visando o estudo dos referidos potenciais. Entre as qualidades, as cascas de maracujá destacam-se como fonte rica em pectina, na ordem de 10-20% (LIEW, CHIN E YUSOF, 2014). De acordo com Liew, Chin & Yusof (2014), a pectina é um polissacarídeo complexo, composto principalmente de

ácido galacturônico, e é largamente utilizado em indústrias como farmacêutica, alimentícia e cosmética.

Como a secagem é uma etapa importante no processo de extração de alguns subprodutos (como os supracitados), uma descrição adequada dessa etapa faz-se necessário. Assim como ocorre na descrição da secagem de outros produtos agrícolas, modelos difusivos têm sido aplicados para a descrição da secagem de cascas de frutas (MPHAHLELE, PATHARE E OPARA, 2019; BEZERRA et al., 2015).

A solução numérica para a equação de difusão é a mais utilizada para resolver problemas mais complexos. Através dela é possível considerar a variação da espessura e da difusividade efetiva do produto em estudo (SILVA, 2012). Segundo Park et al. (2014) os valores para a difusividade efetiva de água dependem tanto das condições experimentais quanto do modelo matemático utilizado. Sendo assim, é notória a importância da escolha adequada para um modelo que expresse corretamente a variação desse parâmetro.

Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo principal aplicar uma solução numérica para a equação de difusão considerando a condição de contorno de terceiro tipo e geometria de uma parede infinita. Este modelo difusivo foi utilizado visando encontrar a expressão matemática mais adequada para a difusividade efetiva de água em função do teor de umidade local, para descrever o processo de secagem de cascas de maracujá.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados experimentais

Os dados utilizados neste estudo, referentes à secagem de cascas de maracujá nas temperaturas de 60 e 70ºC, foram coletados durante a vigência do projeto PIBIC/CNPq-UFCG (2019-2020).

Com os dados experimentais obtidos, calculou-se a razão de umidade $\overline{M}$ adimensional, através da seguinte equação:

$$\overline{M} = \frac{\overline{M}(t) - M_\infty}{M_i - M_\infty} \quad (1)$$

onde $\overline{M}$ (t) é o teor de umidade médio no tempo t, M_∞ é o teor de umidade de equilíbrio e M_i é o teor de umidade inicial (t=0).

2.2 Modelagem Matemática

A Equação de difusão de massa é escrita como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D\nabla M) \quad (2)$$

onde M é o teor de umidade adimensional médio, D é a difusividade efetiva da massa (m_2s^{-1}) e t é o tempo em segundos.

Admitindo a geometria de uma parede infinita, onde x representa a posição na parede, a Eq. (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial M}{\partial x}\right) \tag{3}$$

Para obter a solução numérica daEq. (3) foram admitidas as seguintes hipóteses:

- A parede possui espessura L;
- A parede é homogênea e isotrópica;
- O único mecanismo de transporte de massa dentro da parede é a difusão;
- A espessura da parede pode variar durante a difusão;
- A difusividade efetiva de água pode variar com o tempo e a posição dentro da parede, e o coeficiente de transferência convectiva de massa permanece constante.

Existem vários métodos numéricos que são usados para resoluções de equações diferenciais parciais, tais como: elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos (CADÉ; NASCIMENTO; LIMA, 2005). O método utilizado para a solução proposta neste trabalho foi o Método dos Volumes Finitos, usando uma formulação totalmente implícita (MALISKA, 2013).

O Método dos Volumes Finitos (MVF) consiste em dividir um domínio contínuo em N volumes de controle (VC), como mostrado na Figura 1, e assim, a equação de conservação é aplicada a cada um deles. No centro de cada VC localiza-se um ponto (denominado ponto nodal) onde são calculados os valores das variáveis, implicando em uma equação algébrica para cada VC, onde apresentam os valores das variáveis do ponto calculado e nos pontos vizinhos (GONÇALVES, 2007).

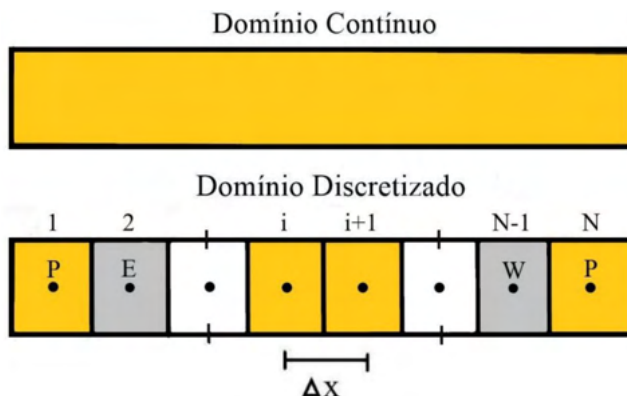



Figura 1: Domínio contínuo e discretizado.

FONTE: Autores.

A discretização é realizada integrando todos os termos da Eq. (3) que governa o fenômeno no espaço (Δx) e no tempo (t) para cada volume de controle do domínio. Sendo assim, o resultado é a equação discretizada contendo os valores de grandeza de interesse. Neste caso, a grandeza de interesse é o teor de umidade. Todo formalismo matemático relacionado à obtenção desta solução numérica pode ser encontrado em Silva Junior et al. (2019).

2.3 *Software* para ajustes e determinação do processo

Para a obtenção dos resultados propostos neste trabalho, foram utilizados os *softwares Lab Fit* e *Infinit Slab Numerical*. O primeiro foi utilizado para a obtenção dos melhores modelos para a descrição da variação da espessura do produto considerando o encolhimento das amostras. O segundo *software*, foi utilizado para a obtenção dos parâmetros da difusividade de água e do coeficiente de transferência convectiva de massa. Para obter tais parâmetros, foi acoplado um otimizador à solução numérica utilizada nesta pesquisa. Este otimizador foi desenvolvido por Silva Junior e Silva (2018) a partir de um método inverso, no qual são atribuídos valores iniciais aos parâmetros do processo e então estes são corrigidos a fim de minimizar uma função objetivo. A função objetivo utilizada foi o qui-quadrado (TAYLOR, 1997).

Com o resultado das otimizações, foi realizado um estudo para avaliar a melhor expressão para a difusividade efetiva com base nos valores do qui-quadrado (X^2) e do coeficiente de determinação (R^2). As expressões estudadas para a difusividade efetiva estão expostas no Quadro 1 a seguir, onde a e b são os parâmetros de ajuste, M é o teor de umidade médio e D é a difusividade efetiva de água.

Nº do Modelo	Expressão para a difusividade
1	$D(M) = b$
2	$D(M) = aM + b$
3	$D(M) = be^{aM}$
4	$D(M) = b\cosh(aM)$
5	$D(M) = be^{a\sqrt{M}}$

Quadro 1: Expressões para a difusividade efetiva de água.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a utilização do modelo descrito na seção 2.2, foi necessário acoplar ao código um otimizador para obtenção dos valores ótimos dos parâmetros termo-físicos do processo. Visto que a solução utilizada considera a variação da espessura do produto, utilizou-se o *software Lab Fit* (Silva e Silva, 2009) para obter a função que descreve tal variação. Os

gráficos da Figura 2 mostram o ajuste do modelo obtido aos dados experimentais para o encolhimento nas duas temperaturas estudadas.

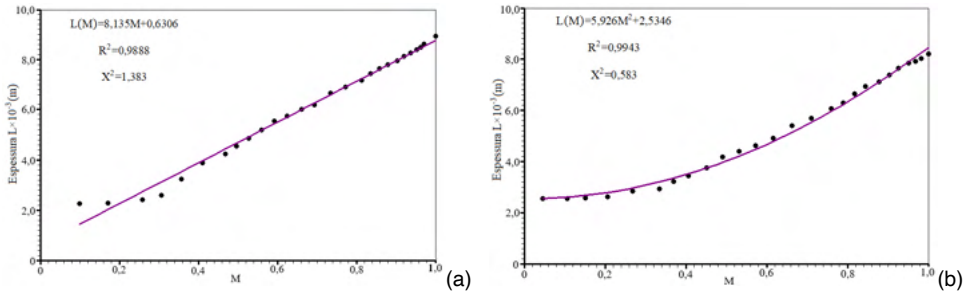



Figura 2: Evolução do encolhimento das amostras secas nas temperaturas de: (a) 60ºC; (b) 70ºC.

FONTE: Autores.

Além do encolhimento, a solução numérica também considera a variação da difusividade efetiva em função do teor de umidade local. Para encontrar a função que melhor descreveria essa difusividade cinco expressões (descritas no Quadro 1) foram analisadas. Este estudo foi realizado a partir dos dados experimentais de secagem de cascas de maracujá na temperatura de 60ºC, e a função que apresentou os melhores indicadores estatísticos foi utilizada para otimização dos dados da temperatura de 70ºC.

A Tabela 1, a seguir, mostra o resultado do estudo para as expressões matemáticas com os valores dos parâmetros obtidos no processo de otimização, onde a e e são os coeficientes de ajuste para a difusividade efetiva de massa e h é o coeficiente de transferência convectiva de massa. Cabe salientar que, para esta análise, foram consideradas malhas com 1.200 volumes de controle e 2.000 *steps* de tempo.

Nº	Parâmetros do processo (T=60ºC)				
	a	b	h	χ^2	R^2
1	-	$4,1131 \times 10^{-8}$	$1,5247 \times 10^{-7}$	$3,4623 \times 10^{-2}$	0,98776
2	$2,776 \times 10^{-1}$	$1,5165 \times 10^{-12}$	$3,0758 \times 10^{-7}$	$1,1323 \times 10^{-3}$	0,99963
3	3,4462	$2,6626 \times 10^{-11}$	$1,9865 \times 10^{-7}$	$1,4512 \times 10^{-3}$	0,99954
4	3,9946	$4,0375 \times 10^{-11}$	$1,8206 \times 10^{-7}$	$2,3013 \times 10^{-3}$	0,99928
5	3,8601	$9,4208 \times 10^{-12}$	$2,4935 \times 10^{-7}$	$6,8134 \times 10^{-4}$	0,99978

Tabela 1: Valores dos parâmetros obtidos via otimização.

Observando os dados contidos na Tabela 1, nota-se que a expressão 5 proporcionou os melhores indicadores estatísticos para a modelagem em estudo, ou seja, apresentou o menor X^2 e R^2 mais próximo de 1. Sendo assim, ela foi escolhida para a realização das

outras análises. Enquanto isso, a expressão 1 apresentou os piores valores, visto que não considera a variação da difusividade.

Em um estudo realizado por Oliveira et al. (2022) foram aplicados dois modelos difusivos para a descrição de secagem de sementes de jaca. O primeiro considerava a variação da difusividade efetiva e da espessura, e o segundo desconsiderava tais variações. Através da análise dos indicadores estatísticos, concluiu-se que o primeiro modelo se ajustou de forma mais adequada aos dados experimentais. Reforçando a importância de considerar a variação da difusividade em modelos difusivos.

A Figura 3 mostra os gráficos de ajuste do modelo aos dados experimentais para cada expressão testadapara a difusividade de massa das amostras secas a 60ºC e utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 1.

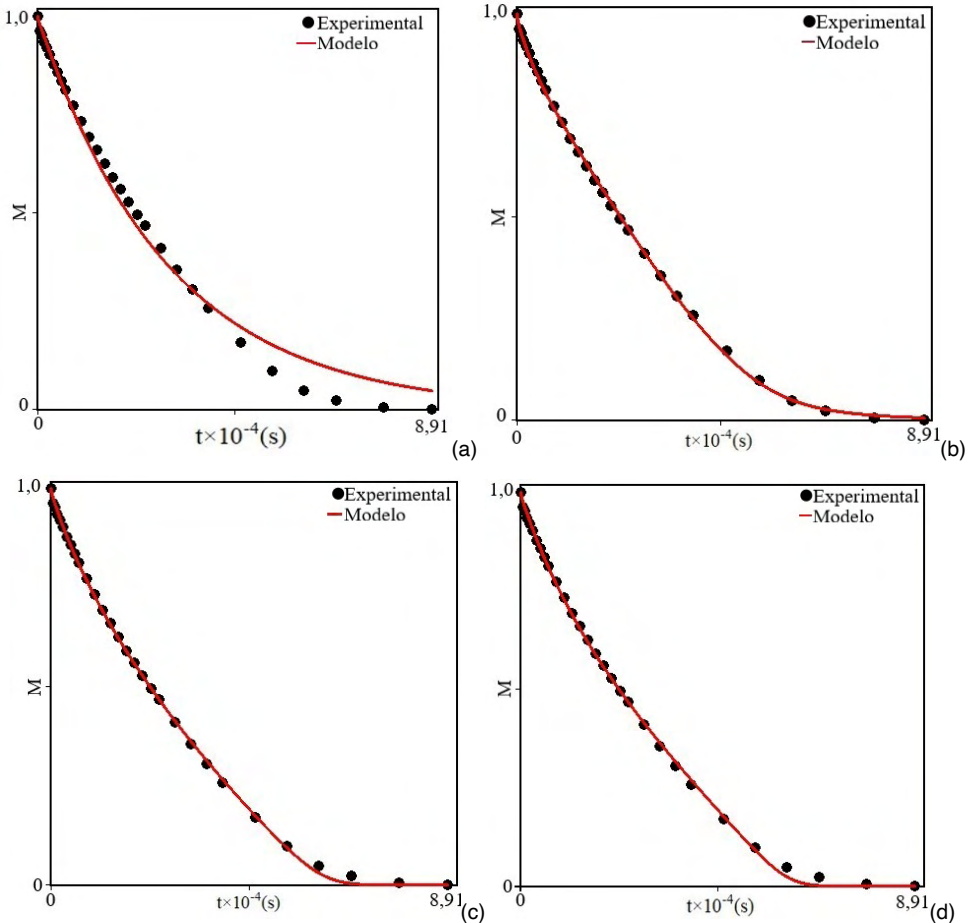
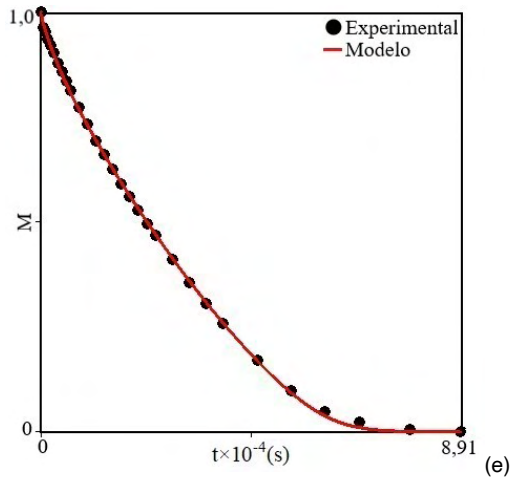



Figura 3: Ajustes do modelo aos dados experimentais das amostras secas a 60ºC utilizando, para a difusividade, a expressão de número: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5.

FONTE: Autores.

Os gráficos da Figura 3 corroboram com o observado através dos parâmetros descritos na Tabela 1, indicando que a expressão 5 influenciou diretamente no ajuste do modelo aos dados experimentais. Desta forma, esta expressão foi utilizada para otimização dos dados da temperatura de 70ºC, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 2 abaixo.

Nº	Parâmetros do processo (T=70ºC)				
	a	b	h	χ^2	R^2
5	1,4013	$4{,}2354 \times 10^{-11}$	$6{,}7817 \times 10^{-7}$	$4{,}9094 \times 10^{-3}$	0,9885

Tabela 2: Valores dos parâmetros obtidos via otimização.

Em seguida, a Figura 4 apresenta o gráfico de ajuste do modelo aos dados experimentais para a temperatura de 70ºC.

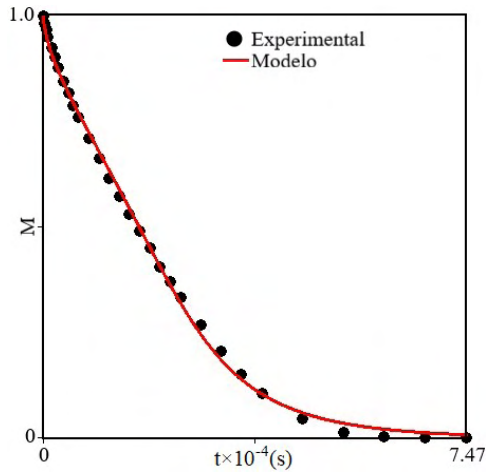



Figura 4: Ajuste do modelo aos dados experimentais das amostras secas a 70ºC.

FONTE: Autores.

Além dos gráficos de ajuste, o *software Infinit Slab Numerical* também fornece gráficos de contorno que simulam a distribuição de água no interior do produto em cada instante de tempo do experimento. Esses gráficos podem ser vistos nas Figura 5 e 6 a seguir.

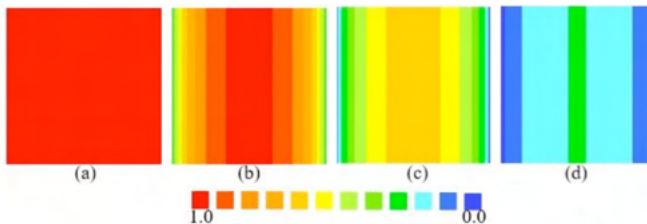



Figura 5: Gráficos de contorno para a secagem com temperatura de 60ºC considerando a condição de contorno de terceiro tipo nos tempos: (a) 0 min; (b) 110min; (c) 375 min; (d) 728 min.

FONTE: Autores.

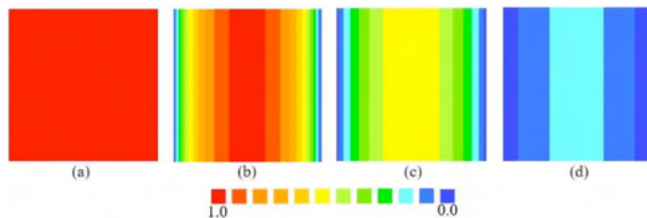



Figura 6: Gráficos de contorno para a secagem com temperatura de 70ºC considerando a condição de contorno de terceiro tipo nos tempos: (a) 0 min; (b) 138min; (c) 345 min; (d) 590min.

FONTE: Autores.

Pela Figura 5 percebe-se que após 728 min de secagem, as fronteiras leste e oeste

do produto já se encontraram em equilíbrio com o meio externo. Já na Figura 6, é possível notar que esse equilíbrio foi obtido depois de 590 min de processo. Isso significa que as amostras secas a 70ºC possuíram uma menor resistência superficial a perca de água durante o processo se comparada às amostras secas a 60ºC, influenciando no tempo total de secagem. Essa resistência também é observada pelos valores do coeficiente de transferência convectiva de massa (h) contidos nas Tabelas 1 e 2.

4 I CONCLUSÕES

Neste trabalho foram testadas cinco expressões matemáticas para a descrição da difusividade efetiva de água durante a secagem convectiva de cascas de maracujá. Foi possível concluir que a melhor expressão para descrever tal processo foi a expressão de número 5, que corresponde a uma função exponencial, visto que apresentou os melhores indicadores estatísticos.

O modelo proposto descreveu adequadamente a cinética de secagem das cascas de maracujá. Pelos valores obtidos via otimização, observou-se que as amostras secas à 70ºC apresentaram uma menor resistência a perda de água no produto, implicando em uma redução no tempo de secagem. Portanto, a metodologia utilizada neste trabalho pode ser aplicada na descrição da secagem de outros produtos orgânicos cuja geometria seja aproximada a uma parede infinita.

AGRADECIMENTOS

O segundo autor desse trabalho agradece à FAPESQ pelo apoio financeiro. As autoras um e quatro desse trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas que as possibilitaram contribuir com a presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, C. V.; SILVA, L. H. M.; CORRÊA, D. F.; RODRIGUES, A. C. **A modeling study for moisture diffusivities and moinsture transfer coefficients in drying of passion fruit peel**. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 85, p. 750-755, 2015.

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; DE LIMA, A. G. B. **Secagem de tijolos Cerâmicos Vazados: Uma Aproximação por Volumes Finitos.** Revista Matéria. V. 10, p. 443-453, 2005.

GALAZ, P.; VALDENEGRO, M.; RAMÍREZ, C.; NUÑEZ, H.; ALMONACID, S.; SIMPSON, R. **Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. Journal of Food Engineering.** v. 208, p. 19-27, 2017.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. Tese (Mestrado em Engenharia Matemática)- Faculdade de Ciências da Universidade de Porto. Porto, p. 16. 2007.

LIEW, S. Q.; CHIN, N. L.; YUSOF, Y. A. **Extraction and Characterization of Pectin from Passion Fruit Peels**. Agriculture and Agricultural Science Procedia. v. 2, p. 231-236, 2014.

MADRUGA, M. S.; ALBUQUERQUE, F. S. M.; SILVA, I. R. A; AMARAL, D. S.; MAGNANI, M.; NETO, V. Q. **Chemical, morphological and functional properties of Brazilian jackfruit (Artocarpus heterophyllus L.)** seeds starch. Food Chemistry. v.143, p. 440–445, 2014.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** LTC: Rio de Janeiro, 2013, 453 p.

MPHAHLELE, R. R.; PATHARE, P. B.; OPARA, U. L. **Drying kinetics of pomegranate fruit peel(cv. Wonderful).** Scientific African. v.5, 2019.

NAYAK, A. K.; PAL, D.; SANTRA, K. **Screening of polysaccharides from tamarind, fenugreek and jackfruit seeds as pharmaceutical excipients**. International Journal of Biological Macromolecules. v. 79, p. 756–760, 2015.

OLIVEIRA, C. F.; GIORDANI, D.; LUTCKEMIER, R.; GURAK, P. D; CLADERAOLIVERA,F.; MARCZAK, L. D. F. **Extraction of pectin from passion fruit peel assisted by ultrasound.** Food Science and Technology. v. 71, p. 110-115, 2016.

OLIVEIRA, T. M. Q.; SILVA JUNIOR, A. F.; FARIAS, V. S. O.; MEDEIROS, R. A.; LIMA, A. R. N. **Description of drying of jackfruit seed through diffusive models.** Journal of Food Processing and Preservation, 00, e16389, 2022.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. P.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. **Secagem: Fundamentos e equações**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v. 16, n.1, p.93-127, 2014.

SILVA, C. M. D. P. S. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e de elipsóides.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2012.

SILVA, W. P.; SILVA, C.A.M.D.P.S. **LAB Fit curve fitting software**, V.7.2.46. (2009); Online. Disponível em:<www.labfit.net>. Acesso em: jan. 2022.

SILVA JUNIOR, A. F.; SILVA, W. P.; AIRES, J. E. F.; AIRES, K. L. C. A. **Numerical approach to describe complementary drying of banana slices osmotically dehydrated.** Heat Mass Transfer. v. 54, p. 267-276, 2018.

SILVA JUNIOR, A. F., FARIAS, V. S. O., ATAÍDE, J. S. P., FRANCO, C. M. R., SILVA, W. P., SILVA, C. M D. P. S. **Description of convective drying of carrot circular slices including shrinkage and variation of effective diffusivity**. Sylwan, v. 163, p. 243-269, 2019.

TAYLOR, J. R. **An introduction to error analysis.** Sausalito, California: University Science Books, 2nd Edition, 1997.

ZHANG, L. L.; LV, S.; XU, J. G.; ZHANG, L. F. **Influence of drying methods on chemical compositions, antioxidant and antibacterial activity of essential oil from lemon peel.** Natural Product research. v. 32, p. 1184–1188, 2018.

CAPÍTULO 5

MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM) COMO ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAR UM PLANO DE MANUTENÇÃO

Data de aceite: 01/04/2022
Data de submissão: 04/02/2022

Esmeralda Hernandez Méndez
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Apizaco
División de estudios de posgrado e investigación
Tlaxcala, México

Miguel Ángel Rodríguez Lozada
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Apizaco
División de estudios de posgrado e investigación
Tlaxcala, México

RESUMEN: En la presente obra se presenta el desarrollo de la técnica de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) como estrategia para optimizar la planeación del mantenimiento en una empresa de la industria de fibra de vidrio y que, a su vez, es una ruta dentro del pilar de confiabilidad perteneciente a la metodología World Class Manufacturing. El objetivo principal es optimizar el plan de mantenimiento del área de rebobinado, para así poder reducir el porcentaje de las pérdidas que se tienen actualmente por el material rechazado a través de la recuperación del mismo, para eso es elementan que los equipos operen en óptimas condiciones, empleando la observación directa, pues a través de esta se realizó la recolección de datos, estableciendo comunicación con la parte estratégica de la empresa. RCM se divide en tres etapas, la primera donde se lleva a cabo la selección, la definición y la recopilación de la información del equipo, todo esto a través de manuales, diagramas y a través del personal que lo opera, con la finalidad de conocer cómo trabaja, posteriormente en la etapa 2, análisis, se realiza una documentación del contexto operativo, es decir, una investigación sobre como funciona y bajo que parámetros debe operar, realizando la definición de los fallos funcionales que se presentan y la identificación de los indicadores, para la etapa 3 se realiza la propuesta de acciones para contrarrestar los hallazgos, lanzando estrategias que sean complemento de las tareas de mantenimiento que actualmente se tienen para el área de rebobinado, al ser una línea con un periodo corto de funcionamiento e instalación, no se cuenta con información histórica, por lo que solo se está realizando el análisis con información que se encuentra en la base de datos registrada, la cual solo comprende al mes de agosto del año 2021.

PALABRAS CLAVE: Planeación del mantenimiento, Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM), Confiabilidad, Disponibilidad.

MAINTENANCE FOCUSING ON RELIABILITY (RCM) AS A STRATEGY TO OPTIMIZE A MAINTENANCE PLAN

ABSTRACT: This work presents the development of the Reliability Centered Maintenance (RCM) technique as a strategy to optimize maintenance planning in a company of the fiberglass industry, which, in turn, is a route within the reliability pillar belonging to the World Class Manufacturing

methodology. For the development of this work, direct observation was used, since it was used to collect data, establishing communication with the strategic part of the company. RCM is divided into three stages, the first one where the selection, definition and collection of information of the equipment is carried out, all this through manuals, diagrams and through the personnel that operates it, with the purpose of knowing how it works, later in stage 2, analysis, a documentation of the operative context is made, that is to say, an investigation on how it works and under which parameters it must operate, making the definition of the functional failures that are presented and the identification of the indicators, for stage 3 the proposal of actions is made to counteract the findings, launching strategies that are complementary to the maintenance tasks that currently exist for the area of rewinding, in the field of maintenance different techniques exist for its administration, the selected technique favors the management of this since it is a complement, as mentioned at the beginning, of the WCM methodology for what it is counted with a point of view.
KEYWORDS: Mainteneance Planning, Relabiality Centered Maintenance (RCM), Relabiality, Availability.

INTRODUCCIÓN

Las exigencias actuales en las industrias con referencia a los costos y servicios de manutención a los bienes físicos pueden brindar soluciones a ciertas inquietudes a través de la administración estratégica y técnicas modernas para el mantenimiento, lo que se está convirtiendo en un cimiento de la tercera generación y complemento de la Manufactura de Clase Mundial (WCM, del inglés World Class Manufacturing) la cual ayuda a alinear los procesos que ya existen con las nuevas tendencias, buscando optimizar la producción y la reducción de costo. El sector de la fibra de vidrio en el mercado mexicano se vuelve cada día más competido, debido a que la demanda de la misma requiere de estándares más controlados y del buen funcionamiento de sus equipos, este último es un factor muy importante para su rentabilidad y competitividad, por lo que es muy importante contar con un porcentaje alto de confiabilidad y disponibilidad de sus equipos.

Uno de los principales problemas dentro de la industria de los textiles técnicos a base de fibra de vidrio es el producto rechazado al no cumplir con los estándares de calidad y generando una perdida significativa para la organización, este material se obtiene del proceso de recubrimiento el cual se encarga de cubrir los hilos de fibra de vidrio con plastisol, este último funciona como recubrimiento superficial otorgando resistencia a la corrosión, abrasión y electricidad, para posteriormente ser curados e ingresar a las winders, las cuales se encargan de formar bobinas, una vez que se realizó este proceso, se libera el material que cumple con las especificaciones de los clientes. Durante el periodo del 2020 al 2021, como consecuencia a la pandemia del virus SARS-CoV 2 se han realizado diferentes cambios a las variables de este proceso generando variaciones en los resultados finales, lo que ha causado el incremento de producto rechazado y trayendo pérdidas del 4% para la organización, para evitar lo anterior, se optó por adquirir 12 rebobinadoras a inicios del

año 2021 las cuales tiene como meta recuperar el 1% las perdidas señaladas. Para cumplir, se distribuyeron los 12 equipos en 4 módulos, cada uno con 3 rebobinadoras para las que se ha planeado operen 3 turnos por día de 8 horas los 365 días del año, por lo que para el mes de agosto la estación en general de rebobinado tendría que haber operado alrededor de 8832 horas, descontando 96 horas de mantenimiento planeado que se debió haber realizado.

DESARROLLO

Para el desarrollo de RCM y con base a información que se tiene, se selección el área de rebobinado, la cual pertenece al proceso de recubrimiento dentro de una empresa de fibra de vidrio y textiles técnicos, como se menciona anteriormente, los 12 equipos están distribuidos en 4 módulos, de 3 rebobinadoras, el área de mantenimiento se ha encargado de elaborar un plan para estos equipos, ya que la rentabilidad y la competitividad de una organización dependen de la operación dentro de los procesos productivos y las condiciones bajo las que operan buscando al final la excelencia para sus procesos, por lo que es importante que estos activos cuenten con la capacidad que se requiere para que realicen las funciones con base a las especificaciones así como la disponibilidad para realizar una función deseada bajo ciertas condiciones durante un periodo o intervalo de tiempo. Mantenimiento a monitoreado a estos equipos durante el mes de agosto del 2021 a través de indicadores como lo son el Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time to Repair (MTTR) y el Overall Equipment Effectiveness (OEE), detectando una variación en los mismos, mostrando un incremento de fallas en los equipos así como la disminución de disponibilidad, generado por la falta de una buena planeación del mantenimiento para el área de rebobinado como se había estbalecido, lo que ocasiono que no se alcanzará la producción que se tenia establecida para este periodo. Para optimizar este plan de mantenimiento y mejorar la confiabilidad y disponibilidad, se toma como estrategia desarrollar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), técnica que pertenece al pilar de confiabilidad de la metodología World Class Manufacturing (WCM). RCM consiste en elaborar, complementar, o bien, optimizar los planes de mantenimiento basándose principalmente en la confiabilidad de los equipos, donde es importante que se involucren las diferentes áreas que conforman a una organización para lograr identificar las causas que ocasionan fallas y determinar diferentes acciones que puedan contrarrestar las averías o prevenirla, para el desarrollo de esta técnica se deben seguir los siguientes pasos:

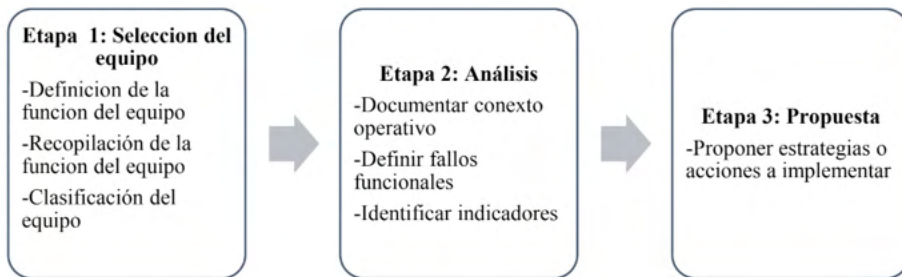



Figura 1. Etapas del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

ETAPA 1 SELECCIÓN DEL EQUIPO

Para esta etapa se selecciona el equipo con el que se va a trabajar para desarrollar la técnica RCM, el cual se ha descrito en párrafos anteriores.

Definición del equipo: El funcionamiento principal de este equipo es convertir bobinas de tipo A y B (material rechazado, scrap) tomando en cuenta la tensión generada por el hilo, el diámetro del alimentador de la bobina para optimizar espacios y tiempos, eliminando el riesgo de obsolescencia del material que se está liberando en el proceso de recubrimiento identificado como scrap, rebobinado aproximadamente 7 bobinas por día por cada rebobinadora.

Recopilación de la información: Se recabo la información del equipo seleccionado a través del manual proporcionado por el fabricante para conocer los sistemas que lo componen, se realiza la clasificación de sus componentes y la agrupación de los mismos en cada uno de los sistemas que contiene el equipo. Iniciando por el sistema mecánico el cual contiene todos los elementos que tiene como función transformar el movimiento generado a través de diferentes fuentes, enseguida se identifico el mecanismo que conforma a la rebobinadora, este es el que se encarga de transformar el scrap recolectando el hilo con determinada tensión generada por la misma y guiada a través del carro guía hilo a través de las cuerdas invertidas del cam, generando el diseño requerido por el cliente, se identificaron también los componentes que conforman la conexión del cam con el módulo de la rebobinadora y su sistema de tensión, este ultimo siendo uno de los mas importante ya que al presentar una tensión baja en el momento de realizar el rebobinado ocasiona defectos en el producto final como bobinas flojas, bobinas desmadejadas o bien, bobinas con anillos. El sistema de transmisión se encarga de transmitir la potencia generada por el motor del equipo directamente hacia las ruedas para poder desplazarse, se identifico que especialmente para este sistema las tareas elementales de mantenimiento son la inspección a las correas de distribución, al capstan y el rodillo de arrastre, una vez que detectaron cuales son los sistemas que conforman a estos equipos, se identificaron las actividades que contenía su plan de mantenimiento, iniciando desde la limpieza, inspección,

lubricación, ajuste y posteriormente, actividades mas técnicas como el cambio de los carros guía hilo.

Clasificación del equipo: Se realiza la clasificación del sistema identificando características básicas como la localización, el uso y tipo de equipo y será representado a través de una pirámide con la finalidad de representar la ubicación desde el componente del equipo, el mismo equipo dentro del proceso y de la organización.

ETAPA 2: ANÁLISIS

Documentar contexto Operativo: En este punto se define el conjunto de condiciones reales del proceso bajo las cuales opera el equipo, incluyendo criterios y parámetros que se están desempeñando y son requeridos por el usuario. Se debe definir a partir de los diagramas y las descripciones del proceso en el que opera el equipo. Para este caso, se llevo a cabo una recolección de datos durante el mes de agosto del año 2021 donde se estableció el promedio en kilogramos de material que debía entregar dicha estación operando en tiempo al 100%, siendo la meta de 15,894 kg, entregando únicamente 7,479 kg y perdiendo 3,009 kg por la presencia de fallas y 1,292 kg por paros no programados relacionados con averías del módulo o por la ausencia de personal.

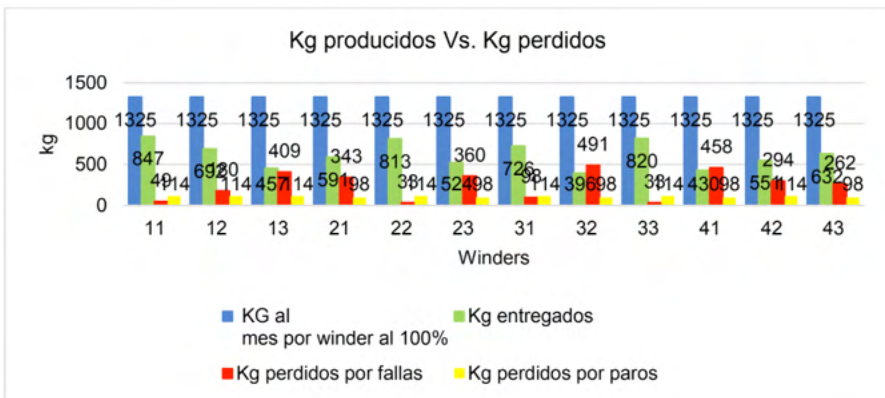



Figura 3. Grafica de kilogramos registrados producidos Vs. Perdidos.

Definir fallos funcionales: Cada rebobinadora presento diferentes tipos de falla, las cuales fueron reportadas turno a turno en los reportes de los supervisores y algunas de ellas con ordenes en el sistema que se emplea, la falla más frecuente fue el que no avanza el guía hilo, reportándose 44 veces durante el mes, seguida de un mal embobinado, bobina floja, y deforme las cuales se presentan por la falta de tensión del hilo, como consecuencia por una mala operación del guía hilo, como se observa en el siguiente diagrama.

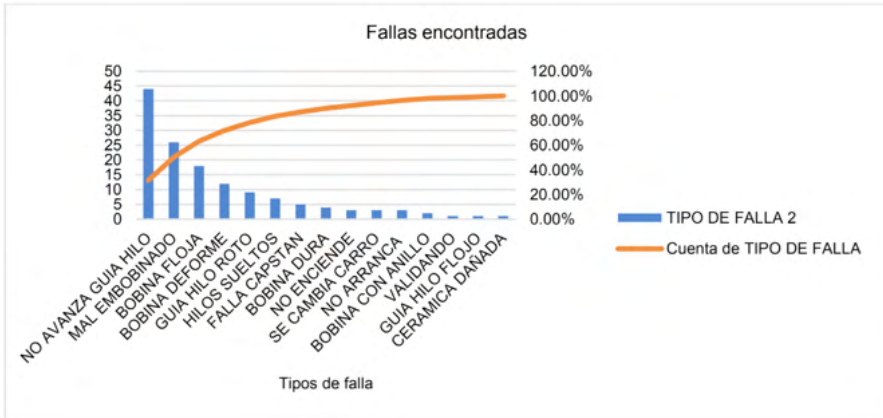



Figura 4. Grafica de fallas encontradas donde se identifican puntos de mejora.

Se realizo una comparación del tiempo expresado en porcentaje que tendrían que estar operando cada una de las rebobinadoras contra el que realmente trabajaron como se observa en la figura, contemplando de igual forma el porcentaje que se fueron a falla y estuvieron paradas, donde se puede visualizar que ninguno de los 12 equipos logro llegar al 100% que se pretendía alcanzar.

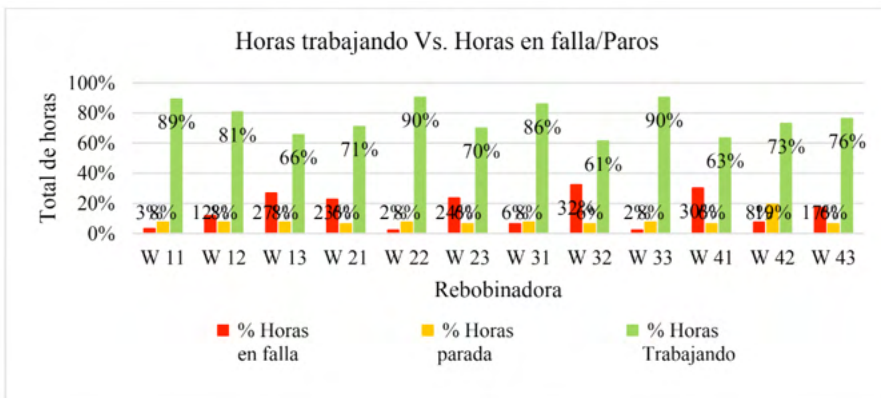



Figura 5. Grafica de tiempo registrado en horas de rebobinadoras trabajando Vs. Horas de fallas/paros.

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo del análisis de modos y efectos de falla, la falla funcional que se tomo fue la que se reporto más veces, siendo “No avanza el guía hilo”, tomando como modo de falla principal el que no cuenta con un guía hilo, representando el 32% del total de modos de falla encontrados durante el análisis y registro de datos, como se muestra en la tabla 1.

Falla funcional	Modo de falla	Causa de falla
No avanza guía hilo	Falta de deslizador de guía hilo	Falta de plástico en el deslizador
		Ruptura de los cerámicos de los carros
		Diferencia de velocidad entre el rodillo y el capstan.

Tabla 1. Análisis de modos y causas de falla encontrados con RCM.

Identificar indicadores

La medición del desempeño es parte fundamental para conocer el cómo se está comportando el equipo que se está analizando y como se está desempeñando el departamento de mantenimiento, midiéndolo través de indicadores clave de desempeño como lo son el OEE, el MTBF y el MTT, para calcular del OEE se deben calcular tres indicadores esenciales los cuales son la disponibilidad, el rendimiento o velocidad y la calidad, una vez identificados esos valores se deberá realizar una multiplicación de los mismos, es importante mencionar que el resultado de ser un mínimo del 85%, valor que establece la metodología WCM. Para obtener el valor de disponibilidad se deberá utilizar la siguiente ecuación: *Disponibilidad = ((Tiempo disponible - tiempo muerto) /tiempo disponible)×100%*

Donde el tiempo disponible se obtiene restando el tiempo disponible total (duración de un turno) menos los paros programados, considerando las horas de mantenimiento planeadas que se tienen. Para esta aplicación se tomo como tiempo disponible un total de 744 horas, las cuales contemplan 3 turnos por día de 8 horas los 7 días de la semana, para los paros programados, con base a los planes de mantenimiento, se identificaron un total de 96 horas en general para la estación de rebobinado, siendo 8 horas por equipo al mes, obteniendo un total de 8832 horas, equivalente a un 75.09%.

Para calcular el rendimiento o velocidad es importante conocer la los parámetros que se necesitan del equipo, posteriormente se aplicara la siguiente ecuación para obtener el dato: Rendimiento=Velocidad real del equipo/Velocidad de disenõ. Donde la velocidad real del equipo es aquella que se esta obteniendo en el proceso a diferencia de la velocidad de diseño, la cual es que trae predeterminada el equipo. Para este caso se toma como velocidad real del equipo los kilogramos que se produjeron durante el periodo seleccionado y como velocidad de diseño los kg que se han establecido para cumplir con la meta, siendo 1325 kg. En la tabla se puede observar la variación con respeto a los kilogramos que se obtuvieron, obtenido un valor del 47% en lo que respecta al porcentaje de velocidad.

Rebobinadora	Tiempo total	Paros programados	Tiempo disponible	Disponibilidad
W 11	744	8	736	88.04%
W 12	744	8	736	79.35%
W 13	744	8	736	64.13%
W 21	744	8	736	69.57%
W 22	744	8	736	89.13%
W 23	744	8	736	68.48%
W 31	744	8	736	84.78%
W 32	744	8	736	59.78%
W 33	744	8	736	89.13%
W 41	744	8	736	61.96%
W 42	744	8	736	71.74%
W 43	744	8	736	75%
Total	**8928**	**96**	**8832**	**75.09%**

Tabla 2. Datos registrados para el cálculo de Disponibilidad.

Rebobinadora	Kg Meta por mes	Kg producidos	% velocidad
W 11	1325	847	64%
W 12	1325	692	52%
W 13	1325	457	35%
W 21	1325	591	45%
W 22	1325	813	61%
W 23	1325	524	40%
W 31	1325	726	55%
W 32	1325	396	30%
W 33	1325	820	62%
W 41	1325	430	32%
W 42	1325	551	42%
W 43	1325	632	48%
Total	**15894**	**7479**	**47%**

Tabla 3. Datos registrados para el cálculo de velocidad/ rendimiento.

El último de los parámetros para poder calcular el OEE es el porcentaje que se tiene de calidad, el cual se obtiene con base a la siguiente ecuación % de cal = ((Piezas producidas defectos rechazados) piezas que se producen) 100. Para el caso de esta aplicación, el porcentaje de calidad se tomará como 100%, ya que se esta manejando material que ha sido rechazado por calidad durante su primera etapa, por lo que se ingresa al área de rebobinado con la finalidad de rescatarlo. Para poder realizar el calculo del

OEE por cada rebobinadora se multiplicaron los valores obtenidos con respecto a la disponibilidad, la velocidad y calidad, siendo el valor de este de 36%, por debajo de lo que marca la metodología WCM y como consecuencia no se esta permitiendo alcanzar la producción esperada. Para el cálculo de MTBF, indicador que hace referencia al tiempo promedio que transcurrió entre una falla y otra, se deberá identificar el tiempo disponible, el tiempo muerto y el número de fallas que se presentaron, por rebobinadora y en general donde el tiempo muerto será el tiempo que dilato una falla o avería en el equipo, una vez realizado lo anterior se emplea la formula, para este caso el MTBF obtenido fue de 147 horas, siendo relativamente alto. Para calcularlo se emplea la fórmula MTBF = Tiempo disponible - tiempo muerto / No. de fallas

Rebobinadora	Disponibilidad	%Velocidad	% Calidad	OEE
W 11	88.04%	64%	100%	56%
W 12	79.35%	52%	100%	41%
W 13	64.13%	35%	100%	22%
W 21	69.57%	45%	100%	31%
W 22	89.13%	61%	100%	55%
W 23	68.48%	40%	100%	27%
W 31	84.78%	55%	100%	46%
W 32	59.78%	30%	100%	18%
W 33	89.13%	62%	100%	55%
W 41	61.96%	32%	100%	20%
W 42	71.74%	42%	100%	30%
W 43	75%	48%	100%	36%
Total	75.09%	**47%**	**100%**	**36%**

Tabla 4. Datos registrados para calcular OEE.

Con base a los datos registrados, se observa que la rebobinadora identificada como W-33 es la que presenta un mayor numero de horas, de 328 horas en lo que respecta al MTBF, lo que indica que el periodo entre fallas es mayor generando una mayor disponibilidad del equipo a comparación de la W-41, que presenta únicamente 17 horas entre falla y falla.

Rebobinadora	Tiempo Disponible	Tiempo muerto	No. De fallas	MTBF
W 11	736	88	2	324
W 12	736	152	8	73
W 13	736	264	19	25
W 21	736	224	18	28
W 22	736	80	1	656
W 23	736	232	19	27
W 31	736	112	4	156
W 32	736	296	19	23
W 33	736	80	2	328
W 41	736	280	27	17
W 42	736	2208	11	48
W 43	736	184	9	61
Total	**8832**	**183**	**139**	**147**

Tabla 5. Datos registrados para calcula el tiempo medio entre fallas (MTBF).

Para el cálculo del MTTR se tomaron en cuenta los tiempos muertos que se registraron y el número de fallas reportadas por cada rebobinadora, para este indicador lo que se busca es que el resultado sea menor, ya que esto indica que el tiempo que se toman para la reparación de los equipos es menor, por lo que habrá una mayor disponibilidad de los mismos para producir.

Rebobinadora	Tiempo disponible	Tiempo muerto	No. de fallas	MTTR
W 11	736	88	2	44
W 12	736	152	8	19
W 13	736	264	19	14
W 21	736	224	18	12
W 22	736	80	1	80
W 23	736	232	19	12
W 31	736	112	4	28
W 32	736	296	19	16
W 33	736	80	2	40
W 41	736	280	27	10
W 42	736	208	11	19
W 43	736	184	9	20
Total	**8832**	**183**	**139**	**41**

Tabla 6. Datos registrados para calcular el tiempo medio para reparar (MTTR).

Se puede observar que el equipo que presenta menor tiempo para realizar las reparaciones es la rebobinadora identificada como W-21, la rebobinadora W-23 y la rebobinadora W-41, caso contario a las rebobinadoras W-11 y W-33. A partir de los datos recabados, se observa que el total de fallas durante el periodo de agosto es elevado, estas averías se relacionaron a las tareas de mantenimiento que se están llevando a cabo, el cual se compone de 20 actividades las cuales fueron indicadas con base a manuales del equipo e información del proveedor, las cuales fue más sencillo identificar con ayuda de RCM.

ETAPA 4: PROPUESTA

Propuesta de estrategias o acciones a implementar

Para contar con una planeación de mantenimiento que está basada principalmente en la confiabilidad y disponibilidad es necesario desarrollar técnicas de mantenimiento que sean modernas y que al ser aplicadas favorezcan al área y a la organización, como es el ejemplo de RCM., para su desarrollo es importante tener identificada el área de aplicación, una vez realizado lo anterior, es elemental seguir las instrucciones que marca la misma. Con base a los datos recabados, se propone desarrollar un plan estratégico para optimizar el plan de mantenimiento que se tiene actualmente del área, donde se deberán establecer los objetivos estratégicos, las actividades a realizar para cumplir esos objetivos estratégicos y los indicadores con los que se les estará dando el debido seguimiento, la frecuencia en la que se estarán monitoreando y el responsable de los mismos. Este plan deberá incluir actividades que beneficien al área caso de estudio, al proceso al que pertenece dicha área y a la organización en general, las acciones que se proponen esta aplicación son: Medir la disponibilidad, el rendimiento y la calidad de la estación, lo que traerá como consecuencia un incremento en la productividad, emplear ensayos no destructivos a través del desarrollo de una herramienta de inspección que permita diagnosticar el estado de los equipos sin deteriorarlo, el cual se aplique durante las etapas de fabricación, montaje y operación, lo que traerá como consecuencia el desarrollo del mantenimiento predictivo, el cual será un complemento para la planeación del mantenimiento.

CONCLUSIÓN

El objetivo principal de esta investigación fue el desarrollo de la técnica RCM para optimizar el plan de mantenimiento que se tiene para el área de rebobinado del proceso de recubrimiento, ya que a través de esta se pudieron encontrar fallas que no se estaban reportando y que están afectando a los diferentes procesos por la falta de disponibilidad de los equipos, lo que esta generando un aumento en las perdidas a nivel organizacional. La finalidad de recuperar material que se ha identificado como scrap es vital, pues es importante

reconocer que el desecho de este material afecta al ser humano y al medio ambiente, a través del desarrollo de un plan estratégico, se añadirán actividades estratégicas que complementen a las tareas que ya se tienen programadas y poder aumentar los valores de la confiabilidad y disponibilidad del área, es importante saber que uno de los problemas mas grandes que enfrentan las empresas hoy en día es el aumento de los mantenimiento correctivos y los paros de línea, ocasionando la carencia de competitividad y rentabilidad. La falta de una correcta planificación y administración del mantenimiento son grandes, el trabajar con RCM como parte de WCM trae una mejora en los indicadores técnicos, por lo que se obtiene beneficios como lo son la disminución de los tiempos muertos en los equipos, el aumento de MTBF y la reducción del MTTR, así como el incremento del OEE.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por todo el apoyo brindado, al Instituto Tecnológico de Apizaco por abrirme las puertas para el desarrollo de esta investigación, Dr. Miguel Ángel Rodríguez Lozada por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a las sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Al Ing. Julio Cesar García Enríquez e Ing. Beatriz Cisneros Alanís, por su amabilidad, su tiempo y las ideas compartidas.

REFERENCIAS

Álvarez, A. **Los ocho pilares del TPM.** Cd. De México, 2020.

Cárcel, F. **Características de los sistemas TPM y RCM en la ingeniería del mantenimiento**. Valencia, España, 2016.

Colmenares, O. **La aplicación del Programa de Mantenimiento Preventivo, en ocasiones genera incertidumbre respecto a los componentes que actúan de manera paralela con el reparado**. Lima, Perú, 2014.

Díaz, A. **Implementación del Mantenimiento Centrado en la confiabilidad en empresas de trasmisión eléctrica**. La Habana, Cuba, 2016.

García, J. **Estructura de mantenimiento. Medellín**, Colombia.2010.

Hernández, Pedro L.; Carro, Miguel; Montes de Oca, Juan; García, Luis; Fernández, Sergio J. **Optimización del mantenimiento preventivo, utilizando las técnicas de diagnóstico integral.** Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.

Linares. O. **Del mantenimiento correctivo al mantenimiento centrado en la confiabilidad**. Villa Clara, Cuba, 2015.

Martínez, I.**Diseño de un modelo para aplicar el mantenimiento productivo total a los sectores de bienes y servicios** México,2009.

Moubray, J. **Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad**. Industrial Press Inc.Londres, Inglaterra. s.f.

Quintero, J. **Mantenimiento con planeación estratégica**. Bogotá, Colombia, 2015.

Vázquez, D. **Indicadores de evaluación de la implementación del lean manufacturing en la industria**. Escuela de ingenierías industriales, 2013.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE PEÇAS RESULTANTES DO FRESAMENTO DE TOPO RETO UTILIZANDO MATLAB

Data de aceite: 01/04/2022

Leon Yuhiti Mori Correa da Cunha
Engenharia mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil

Milton Luiz Polli
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba

RESUMO: A qualidade superficial é uma característica importante das peças usinadas, sendo que um dos principais fatores que a afetam são as vibrações que ocorrem durante o processo de usinagem. Neste trabalho é pesquisada a possibilidade de simular computacionalmente as superfícies tridimensionais de peças usinadas por fresamento topo reto que levem em conta as vibrações do processo de usinagem. Para tal foram utilizados modelos matemáticos e dados experimentais encontrados na literatura, e o programa MATLAB para simular a trajetória da ferramenta, as forças e vibrações resultantes do processo. Com esses dados foi possível criar uma representação tridimensional da superfície resultante e avaliar a sua rugosidade. Foram obtidos resultados que simularam uma superfície de uma parede de peça usinada por fresa topo reto tanto em condição de estabilidade quanto em condição de instabilidade. O resultado destas simulações estão de acordo com os dados obtidos da literatura e comprovaram a viabilidade da proposta de pesquisa.
PALAVRAS-CHAVE: MATLAB, simulação, usinagem e fresamento.

SIMULATION OF WORKPIECE SURFACES RESULTING FROM END MILLING WITH MATLAB

ABSTRACT: The surface quality is an important characteristic of machine parts, with vibrations of the machining process being one of the most important factors that define the surface quality. This research was undertaken to test the viability of creating simulations of tridimensional surfaces of end-milled parts that took into account the forces and the vibrations of the milling process. For this purpose, mathematical models proposed in the scientific literature, experimental data and the MATLAB program were employed for simulating the tool path, the forces and vibrations resulting from the cutting process. With this data it was possible to create a tridimensional representation of the resulting machined surface and analyse its roughness. The results obtained in the present work simulated wall surfaces end milled in both stable cutting conditions and unstable cutting conditions. These simulations were in agreement with the data found in literature and proved the viability of the research objective.
KEYWORDS: MATLAB, simulation, machining and milling.

1 I INTRODUÇÃO

Com a chegada de ferramentas computacionais a simulação tridimensional de peças se tornou uma realidade, com o uso de *softwares* CAD (Computer Assisted Design)

CAM (Computer Assisted Manufacturing). Esses *softwares* muitas vezes por meio de modelos matemáticos conseguem simular as etapas de usinagem de uma peça e mostrar um modelo tridimensional destas ao usuário, porém este modelo geralmente é simplificado, não é levado em consideração as interações dinâmicas reais entre a peça e a ferramenta que tem resultados bem expressivos na qualidade superficial da peça, como a vibração e influência da velocidade de avanço na rugosidade. E considerando que de acordo com Niu et al (2020) o perfil da superfície é um dos aspectos mais importantes para a avaliação do processo de fresamento e que para Schmitz e Smith (2009) ainda não há um amplo entendimento sobre as dinâmicas do processo de corte foi escolhido o tema para a pesquisa.

Sendo assim, seria possível com o auxílio de modelos matemáticos e o uso de software MATLAB criar simulações de superfícies tridimensionais de uma peça que levem em consideração essas interações dinâmicas entre a peça e a ferramenta? Conseguindo dessa maneira trazer um *feedback* para o usuário, que avaliaria as forças envolvidas no processo de usinagem, a rugosidade superficial resultante e as vibrações envolvidas no processo de usinagem. E com esses dados simular a superfície da peça que permitiria uma visualização da qualidade superficial que se espera obter com os parâmetros de corte estabelecidos.

Para os parâmetros deste trabalho foi escolhido analisar o processo de fresamento de topo reto com dentes helicoidais, incluindo as forças de usinagem envolvidas, as vibrações resultantes, o caminho percorrido por cada dente e por fim reunir todos esses dados em uma matriz com coordenadas cartesianas que permitiria por intermédio do software MATLAB montar uma superfície tridimensional simulada.

2 | MÉTODO

O desenvolvimento do algoritmo de simulação foi feito através da linguagem de programação MATLAB com base na literatura encontrada em Schmitz e Smith (2009), foi escolhido um modo de simulação no domínio do tempo de caminho de ferramenta cicloidal. O primeiro passo foi definir as variáveis: coeficiente de força na direção tangencial, coeficiente de força na direção radial, constante tangencial, constante radial, rigidez, velocidade de rotação, diâmetro da ferramenta, taxa de amortecimento, frequência natural, ângulo de entrada e saída do corte, profundidade de corte, avanço por dente, número de dentes, ângulos dos dentes, ângulo de hélice, velocidade de rotação, número de revoluções a serem simuladas, número de passos ou *steps* a serem simulados por revolução e número de planos perpendiculares ao eixo Z a serem simulados do percurso da ferramenta.

Após as variáveis serem determinadas é calculado o aumento do ângulo da ferramenta para cada passo, o atraso do ângulo da ferramenta para cada altura simulada e com isso através de três *loops for* e das seguintes equações Eq. (1) e Eq. (2) é possível calcular as matrizes das coordenadas X e Y para cada dente para cada passo a ser

simulado do trajeto da ferramenta em três matrizes tridimensionais que registram a posição dos gumes de corte de cada dente em relação ao número do passo do percurso simulado.

$$surfx(cnt1,\ cnt2,\ cnt3)\ =\ r.sen(phi)\ +\ dfeed.(cnt1\ -\ 1) \tag{1}$$

$$surfy(cnt1,\ cnt2,\ cnt3)\ =\ r.cos(phi) \tag{2}$$

Com *cnt1* sendo o número do passo do percurso ou *step*, *cnt2* o número do dente e *cnt3* o número do plano da altura, *phi* o ângulo de imersão, r o raio da ferramenta em metros, dfeed o avanço em metros na direção x para cada *step* tomado. O avanço acontece somente na direção x.

Já a coordenada Z é constante para todos os *steps* e apenas muda quando é analisada outro plano da altura da ferramenta, então o cálculo de seu vetor coordenada é feito usando apenas um *loop for* e as Eq. (3) e Eq. (4).

$$db\ =\ b/(steps_axial\ -\ 1) \tag{3}$$

$$zsurf(cntz)\ =\ (cntz\ -\ 1).(db) \tag{4}$$

Com *b* sendo a profundidade de corte em metros, *steps_axial* o número de planos simulados da altura, *db* o incremento da coordenada Z entre cada fatia da ferramenta em metro e *cntz* o número do plano da ferramenta.

Com esses três vetores calculados tem-se coordenadas cartesianas do caminho da ferramenta para todos os pontos que serão simulados em relação a qual *step*, número de dente e número de plano. Pode-se então avançar para o próximo passo que é o cálculo das forças de corte envolvidas e da vibração resultante desta.

O cálculo das forças de corte é feito para cada *step* através da espessura aproximada do cavaco, para determinar essa espessura é calculada a distância entre o ponto C e o ponto D, com o ponto C sendo a coordenada do ponto a ser simulado do dente e o ponto D a interpolação entre dois pontos da passagem do dente anterior cujo os ângulos limitam o ângulo de C, como mostrado na Fig. 1.

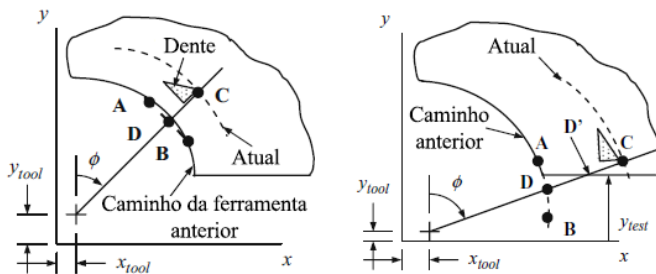



Figura 1 – Trajetória dos dentes da ferramenta durante (esquerda) e saída (direita) do corte.

Fonte: Schmitz e Smith (2009).

Caso haja redução na espessura do cavaco ocasionada na entrada ou saída do corte pode-se calcular a espessura do cavaco determinado um novo ponto D', que substitui o ponto D ou o ponto C dependendo qual deles se situa fora da fronteira de corte. Com a espessura do cavaco obtida pode-se calcular as forças de corte tangenciais e normais de cada dente para cada *step* usando a Eq. (5) e Eq. (6).

$$Ft = Kt.db.h + Kte.db \quad (5)$$

$$Fn = Kn.db.h + Kne.db \quad (6)$$

Com *Ft* sendo a força tangencial em Newtons, *Fn* a força radial em Newtons, *db* o incremento da coordenada Z entre cada fatia da ferramenta em metro, *h* a espessura do cavaco em metros, *Kt* o coeficiente de força na direção tangencial em N/m^2, *Kn* o coeficiente de força na direção radial em N/m^2, *Kte* a constante tangencial em N/m e *Kne* a constante radial em N/m.

Usando as forças radiais e tangenciais para cada dente envolvido no corte durante o *step* analisado pode-se calcular as forças na direção X e na direção Y para cada dente usando a Eq. (7) e Eq. (8).

$$Fx = Ft * cos(phi) - Fn * sen(phi) \quad (7)$$

$$Fy = Ft * sen(phi) - Fn * cos(phi) \quad (8)$$

Com Fx a força na direção X e Fy a força na direção Y.

Somam-se então as forças Fx de todo os dentes envolvidos no corte para o *step* analisado em um vetor denominado Forcex que armazena o valor das forças resultantes na direção X para cada *step* do percurso da ferramenta, o mesmo é feito com as forças Fy em um vetor denominado Forcey, esses vetores serão utilizados para o cálculo do deslocamento causado pelas forças de corte.

O deslocamento causado pela força é calculado por uma solução no domínio do tempo proposta por Tlusty e Ismail (1981) estas são resolvidas iterativamente pelo método de Euler para X e Y. As acelerações são calculadas a partir das forças para cada grau de liberdade e duplamente integradas para se chegar aos deslocamentos da ferramenta usando as Eq.(9), Eq.(10), Eq.(11) Eq.(12) e Eq.(13).

$$x'' = (Fx - cx.x' - Kx.x)/mx \quad (9)$$

$$x' = x''.dt + x' \quad (10)$$

$$x = x'.dt + x \quad (11)$$

$$cx = 2.zetax.\sqrt{(mx.Kx)} \quad (12)$$

$$mx = Kx/wmx^2 \quad (13)$$

Com *dt* sendo o tempo entre *steps* em segundos, zetax sendo a razão de amortecimento, *wmx* a frequência natural em rad/s, *Kx* a rigidez em N/m. Equações

similares são usadas para o deslocamento em Y.

Com as coordenadas X e Y em matrizes tridimensionais que registram a posição dos gumes de corte de cada dente em relação ao número do *step* do percurso simulado, número do dente e qual fatia da altura da ferramenta. Com essas matrizes é feito um processamento de dados para extrair os pontos das coordenadas que compõem a superfície da peça usinada, primeiro é selecionado os pontos que estão mais próximos à superfície da peça, depois todos os pontos são organizados em ordem ascendente em relação ao eixo X, em seguida é usado um *loop* que compara os valores da coordenada Y dos dois próximos pontos e mantêm apenas o maior destes dois pontos, o processo é repetido até que se mantenha apenas os valores em uma matriz bidimensional que compõem uma superfície simulada da peça, isso é feito para todas as fatias que compõem as diversas alturas no eixo Z do percurso da ferramenta.

Com as coordenadas em X, Y e Z que representam a superfície simulada resultante do processo de fresamento analisado é possível simular rugosidade Ra em micrômetros dessa superfície calculando a média dos picos e vales da coordenada Y pelo percurso simulado.

Utilizando as matrizes de coordenadas que representam a superfície de uma peça usinada é possível processá-los em dados que possam ser inseridos em uma função *surf* que montará uma superfície tridimensional, para isso primeiro transforma-se as três matrizes coordenadas X, Y e o vetor de Z em vetores coordenadas classificados pelo *step*, então é usada a função *linspace* para os valores mínimo e máximo de X, o mesmo é feito para os valores mínimo e máximo de Z, isso cria dois vetores de pontos equidistantes entre esses valores. Esses vetores então são usados para criar matrizes de pontos equidistantes usando a função meshgrid que então são usadas como pontos de consulta para a função *griddata* que interpola os pontos dos vetores X, Y e Z resultando em uma matriz de pontos que representam as alturas em Y em relação aos valores de X e Z. Essa matriz de Y juntamente com os vetores X e Z são utilizados com a função surf para gerar uma simulação tridimensional da superfície da peça usinada.

Para validar os resultados das simulações foram empregados os dados experimentais de Zhongqun e Qiang. (2008), onde coeficiente de força tangencial Kt = 796 N/mm^2, coeficiente de força radial Kn = 168 N/mm^2, constante tangencial Kte = 27,7 N/mm e constante radial Ktn = 13,5 N/mm, com parâmetros modais a seguir:

Direção	Frequência natural (Hz)	*Razão* de amortecimento	K ou Rigidez (N/m)
	1198	0,041	$1,20.10^7$
X	1389	0,048	$1,30.10^7$
	1589	0,027	$3,70.10^6$
	1214	0,071	$1,24.10^7$
Y	1428	0,049	$1,52.10^7$
	1591	0,031	$3,56.10^6$

Tabela 1 – Dados.

Fonte: Zhongqun e Qiang (2008).

3 I RESULTADOS

A Fig. 2 representa a superfície simulada na parede da peça em situação de estabilidade, ou seja, as vibrações tiveram pequena amplitude, para uma rotação de 15900 rpm, diâmetro de ferramenta de 12 mm, com 2 dentes, profundidade de corte de 0,8mm e imersão radial de 12 mm. A Fig. 3 mostra as forças e deslocamentos vibracionais para essa condição. A Fig. 4 representa a simulação em situação de instabilidade, onde foi usada uma rotação de 13500 rpm, profundidade de corte de 0,3 mm e mesma ferramenta. Os resultados destas simulações estão de acordo com os obtidos experimentalmente por Zhongqun e Qiang. (2008).

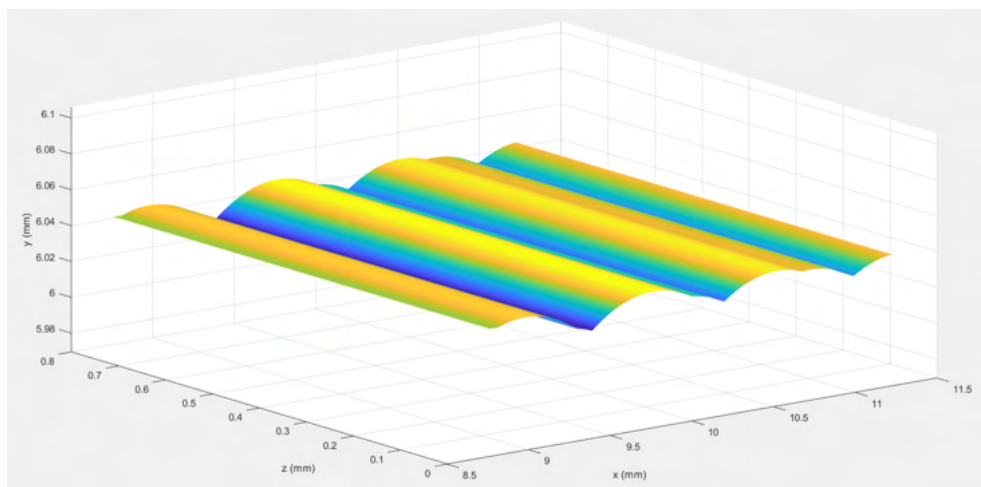



Figura 2 – Superfície simulada para uma condição estável Ra 3.10 μm.

Fonte: Autoria própria (2021).

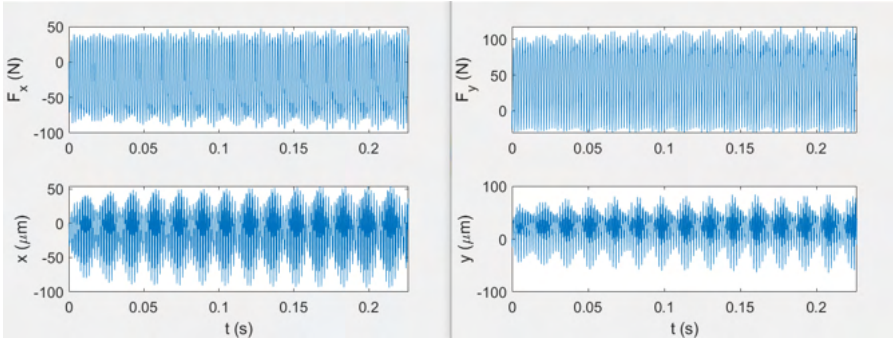



Figura 3 – Forças e deslocamentos para uma condição estável.

Fonte: Autoria própria (2021).

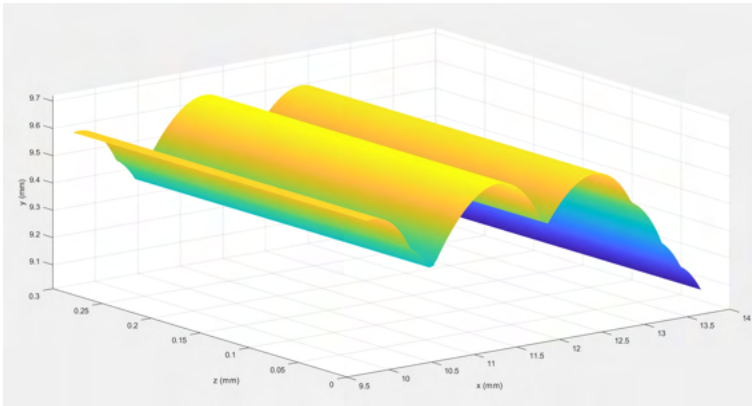



Figura 4 – Superfície simulada para condição instável.

Fonte: Autoria própria (2021).

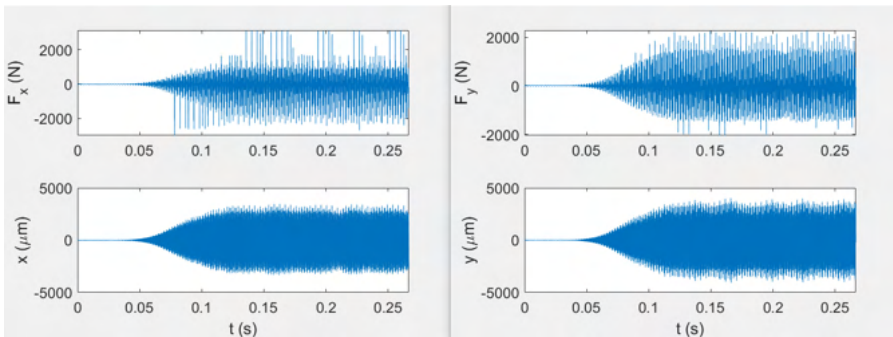



Figura 5 – Forças e deslocamentos para uma condição instável.

Fonte: Autoria própria (2021).

Na primeira simulação houve uma vibração realista com um Ra similar ao esperado por um processo nessas condições, já no segundo em situações reais provavelmente haveria a quebra da ferramenta, pois a vibração foi de uma grande amplitude.

4 I CONCLUSÃO

Pode-se observar com os resultados que é possível gerar superfícies tridimensionais que levam em consideração as vibrações do processo de fresamento topo reto utilizando dos modelos matemáticos propostos por Schmitz e Smith (2009) e Tlusty e Ismail (1981), e essas simulações funcionam tanto em condições de estabilidade quanto de extrema vibração.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento são prestados a Fundação Araucária pelo apoio financeiro, a UTFPR campus Curitiba, ao professor Milton Luiz Polli e a meus pais.

REFERÊNCIAS

SCHMITZ, T. L.; SMITH, K. S.. **Machining Dynamics frequency response to improved productivity**. New York: Springer, 2009.

TLUSTY, J.; ISMAIL, F. Basic Nonlinearity in Machining Chatter. **Annals of the CIRP**, v. 30, n. 1, p. 299-304, 1981.

ZhongQu, L.; QIANG, L.. Solution and analysis of charter stability for end milling in the time domain. **Chinese Journal of Aeronautics**, v.21, p. 169-178, 2008.

Niu, J.; Jia, J.; Sun, Y.; Guo, D.. Generation mechanism and quality of milling surface profile for variable pitch tools considering the runout. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v.142(12), p. 1-35, 2020.

CAPÍTULO 7

VALIDAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO UTILIZANDO OS SOFTWARES ANSYS® E MATLAB®

Data de aceite: 01/04/2022

Marie Madeleine Sarzi Inácio
Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Rubens Gallo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio
Cornélio Procópio

RESUMO: O trabalho tem como propósito realizar a análise da integração do método direto, com aplicação de condições de contorno em simulações numéricas desempenhadas pelo software MATLAB®, e comparar os resultados obtidos com a modelagem realizada no software ANSYS®, seguindo as mesmas condições de contorno, tendo foco a validação da utilização do método direto para estimativas dos efeitos de transferência de calor. Realizou-se no MATLAB®, a implementação do método direto para regime transiente, considerando o método do gradiente conjugado (CGS) método iterativo que se aplica a eliminação de Gauss, e obteve-se resultados. Posteriormente desenvolveu-se um modelo no software ANSYS® com os mesmos parâmetros considerados para a análise anterior, e assim, comparou-se os resultados. Avaliou-se que os resultados de temperatura máxima foram satisfatórios devido ao erro de 2%, sugerindo assim que a aplicação do método se faz relevante em problemas de transferência de calor que objetiva analisar por meio de simulações numéricas.

PALAVRAS-CHAVE: Método direto, Transferência de calor, Simulação numérica.

VALIDATION OF THE NUMERICAL METHOD USING THE SOFTWARE ANSYS® AND MATLAB®

ABSTRACT: The work aims to carry out the analysis of the integration of the direct method, applying boundary conditions in numerical simulations performed by the MATLAB® software, and compare the results obtained with the modeling performed in the ANSYS® software, following the same boundary conditions, focusing on the validation of the use of the direct method for estimating the effects of heat transfer. The direct method for transient regime was implemented in MATLAB®, considering the conjugate gradient method (CGS) iterative method that applies the Gaussian elimination, and obtained results. Later, a model was developed in ANSYS® software with the same parameters considered for the previous analysis, and thus, the results were compared. It was evaluated that the maximum temperature results were satisfactory due to the error of 2%, thus suggesting that the application of the method is relevant in heat transfer problems that aim to analyze through numerical simulations.

KEYWORDS: Direct Method, Heat Transfer, Numerical Simulation.

1 | INTRODUÇÃO

Existem técnicas que possuem dificuldades na aquisição direta dos dados, como por exemplo a de um processo de

fabricação complexo, na qual gera-se efeito de transferência de calor entre a superfície do material e a ferramenta utilizada, ocasionando excessivas temperaturas em sua performance, consequentemente provocando danos térmicos na microestrutura do material. Aplica-se o método de transferência de calor reversa para determinação das temperaturas desenvolvidas em regiões de uma superfície, e a qualidade da mesma está diretamente relacionada a temperatura gerada, Barrios (2013) por exemplo, utiliza-se do método inverso de Gauss-Newton, o qual baseia-se na expansão da série de Taylor, para estudo das primeiras derivadas na determinação do fluxo térmico gerado pelo processo de retificação.

Quando aplica-se analises com a metodologia reversa, torna-se possível estabelecer condições de processos de forma assertiva, sobressaindo em vantagens econômicas e sobre a obtenção de resultados, que posteriormente podem ser validados com ensaios experimentais. A transferência de calor é muito utilizada em sistemas de engenharia e em diversas áreas do cotidiano, não há necessidade ir muito a fundo para encontrar áreas aplicáveis. Se estuda vários sistemas de engenharia ou processos físicos de forma experimental, com testes e medidas, e analítica por meio de cálculos ou análises matemáticas (CENGEL, 2012, p.5).

Sabe-se também que a utilização de problemas inversos sucede em áreas fundamentais do conhecimento humano, na medida em que, há conhecimento de efeitos e há necessidade de determinação das causas dos mesmos (CUSTÓDIO, 2016).

Silva (2011), realizou-se um experimento controlado e obteve-se a comparação de técnicas de transferência de calor reversa, como a Brent, Seção Áurea, Função Especificada, Regularização de Tikinov e Métrica Variável, relacionando-as à análise de precisão e o tempo do processamento consumido para estimar o fluxo de calor.

Com o método reverso da Secção Áurea, Carvalho (2013) desenvolveu-se uma modelagem térmica tridimensional em regime transiente, considerando-se a ferramenta de corte, o conjunto ferramenta, o calço e o porta-ferramentas, a fim de determinar o fluxo de calor e dos campos térmicos gerados no processo de torneamento.

Mediante a necessidade de modelos numéricos para análise de problemas inversos, é válido implementar o método direto para estimativas dos efeitos de transferência de calor? O objetivo do presente trabalho é analisar e validar aplicação do método direto em problemas de transferência de calor reversa, com a realização de implementação numérica e simulações nas condições propostas para transferência de calor.

2 I MÉTODO

Utilizou-se o método direto para a análise, com aplicação da equação de difusão de calor para o problema de transferência de calor. Atribuiu-se forma tridimensional e transiente para o sistema, desprezando-se a geração de calor dentro do elemento sólido

e adotou-se a condutividade térmica constante em relação a temperatura. Descreve-se a equação da difusão de calor como apresenta a Eq. (1).

$$\frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \times \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

O objetivo da resolução da Eq. (1) é aquisição de distribuição de temperatura, em razão disto foi-se imprescindível considerar as condições de contorno no qual submeteu-se o elemento.

Realizou-se o desenvolvimento numérico visando obter a distribuição de temperatura da amostragem, foi-se necessário resolver a equação da difusão de calor, utilizando o método de volumes finitos com a formulação explicita. Definiu-se as dimensões das malhas e o passo de tempo, contendo uma solução linear conforme apresentado abaixo na Eq. (2).

$$A \times T = B \quad (2)$$

Para a solução do sistema linear da Equação (2), estabeleceu-se a utilização do método do gradiente Conjugado (CGS – Conjugate Gradient Solver), método iterativo que se utiliza da eliminação de Gauss. A seleção do método CGS orientou-se pela acessibilidade de implementação. O balanço de energia se empregará há todos os nós existentes nas malhas em x, y e z, para resolução da equação no sistema estabelecido. Partiu-se para o proposto utilizando-se recursos computacionais, com a implementação no MATLAB®, um software iterativo voltado para cálculos numéricos. Definiu-se então, as condições de contorno para a continuidade do desenvolvimento computacional. Estabeleceu-se parâmetros importantes para a simulação, inicialmente determinou-se as propriedades do material a ser utilizado para a simulação, segue na Tab. 1.

Massa especifica $(\frac{kg}{m^3})$	Calor especifico $(\frac{J}{kg \times K})$	Viscosidade absoluta $(Pa \times s)$	Condutividade térmica $(\frac{W}{m \times K})$
7580	434	1	60,5

Tabela 1 – Propriedades do material.

Fonte: Autoria própria (2021).

Delimitou-se as dimensões *Lx, Ly, Lz* respectivamente como 100x50x100 mm, apresentado na Fig. 1.

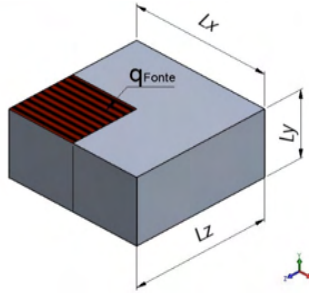



Figura 1 – Dimensões do bloco.

Fonte: Autoria própria (2021).

No estudo realizado aplicou-se isolamento térmico no elemento, o fluxo de calor prescrito, a temperatura prescrita, e a convecção. Ainda, definiu-se a malha numérica para n = 20 nas direções x, y e z, e as condições de contorno do sólido como consta na Tab. 2.

Condição inicial	Face superior	Face inferior	Face esquerda	Face direita	Face frontal	Face traseira
q ($\frac{W}{m^2}$)	0	0	0	0	0	0
h ($\frac{W}{m^2 \times K}$)	20	20	20	20	0	20
Temperatura ambiente (°C)	30	30	30	30	30	30

Tabela 2 – Condição de contorno.

Fonte: Autoria própria (2021).

Determinou-se que o fluxo de calor na fonte é q_{fonte}=2E6 $\frac{W}{m^2}$, com posicionamento definido e dimensão a_x=50mm e a_z=50mm, como se apresenta na Fig. 2.

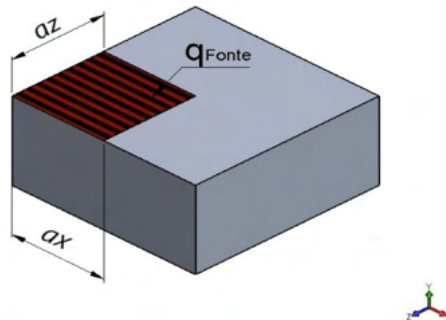



Figura 2 – Posicionamento da fonte no modelo.

Fonte: Autoria própria (2021).

Como a análise se fez em regime transiente, os parâmetros para a simulação foram definidos como apresenta-se na Tab. 3.

dt	$t_{máx}$	$T_{inicial}$
$0,1\ s$	$60\ s$	22 ℃

Tabela 3 – Parâmetros de simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos dados definidos, iniciou-se o desenvolvimento das simulações no MATLAB® e a criação de um modelo no ANSYS®. Com o MATLAB obteve-se a programação de transferência de calor tridimensional no regime transiente e realizou-se a simulação para análise dos dados. Assim então, elaborou-se a matriz A e B, com a definição dos parâmetros de entrada, também criou-se um *Setup* contendo as condições de contorno e propriedades físicas do material, e a parametrização da simulação correspondente ao processo explícito. Na fase final, realizou-se a conexão das informações de entrada e a simulação.

Utilizou-se o ANSYS® Workbench, sistema CAD para reprodução do design e CAE para a simulação do modelo, introduziu-se as propriedades do material na secção de *Engineering data*, conforme citado na Tab. 1. Posteriormente em *Geometry*, desenvolveu-se o desenho da geometria proposta conforme as dimensões contidas na Tabela 2, e em *Model* definiu-se condições do modelo 3D. Também, aplicou-se a malha numérica estabelecida, e as condições de contorno do sólido na secção Setup como consta na Tab. 3. Utilizando a definição do fluxo de calor na fonte, sua dimensão e seu posicionamento estabeleceu-se os parâmetros da fonte como apresentou-se na Fig. 2, anteriormente.

RESULTADOS

Com a simulação no MATLAB®, alcançou-se os valores de Tmáx = 1.047,4 °C e Tméd = 198,11 °C. Em seguida gerou-se um gráfico contendo a temperatura máxima atingida no tempo determinado, visando analisar os resultados.

Do mesmo modo, com a simulação realizada no ANSYS®, atingiu-se os valores de Tmáx = 1.069,3 °C e Tméd = 198,03 °C, e plotou-se gráficos com a variação da temperatura máxima e mínima no tempo para estudo.

Realizou-se então, a comparação entre as temperaturas máximas obtidas no ANSYS® e no MATLAB®, apresenta-se na Fig. 3.

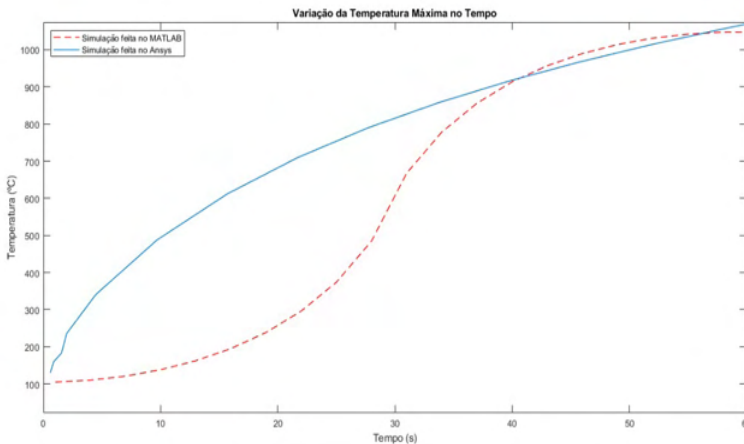



Figura 3 – Comparação da temperatura máxima.

Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que as curvas são crescentes e atingem valores próximos, com os resultados obtidos, constata-se que a utilização do método de volumes finitos para a resolução da equação de difusão de calor se fez adequado. Visto os resultados, entende-se também que o comportamento de regime transiente adotado inicialmente foi determinante para uma análise efetiva.

Após comparação dos resultados obtidos, observa-se que os encontrados de temperatura máxima foram satisfatórios devido ao erro de aproximadamente 2%, que é considerado baixo, e acredita-se que essa diferença possa existir devido ao refinamento das análises nos softwares.

3 | CONCLUSÃO

Conclui-se a partir de todo estudo que o objetivo de validar a utilização do método direto em problemas inversos de transferência de calor foi alcançado, em função da análise numérica tridimensional realizada, visto que as temperaturas máximas de ambos modelos computacionais se aproximaram, contendo um erro mínimo de 2%. Constatou-se que o tempo de processamento consumido pelo MATLAB® foi relativamente alto, entendendo que se houvesse o refinamento das malhas nos parâmetros utilizados, os resultados gerados levariam um tempo muito maior para serem obtidos, e também seria necessário um equipamento contendo alta capacidade de processamento. Entende-se que o erro contido, se faz presente em virtude do refinamento das malhas e pretende-se futuramente realizar novas analises para avaliar redução do erro existente. Ainda para trabalhos futuros, pretende-se implementar novas simulações afim de discutir os resultados para temperatura máxima igual a 30 segundos, devido a diferença de temperatura encontrada nos resultados

na figura 3.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, meus colegas, e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que mesmo com todas dificuldades encontradas durante o período me deram suporte para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa:** Uma abordagem prática. 4. ed. São Paulo: AMGH, 2012. 915 p.

CUSTÓDIO, Caroline. **Técnicas de transferência de calor reversa**. 2016. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

BARRIOS, A. N. S. Modelagem **térmica para avaliação da temperatura no fresamento de aços para moldes e matrizes.** Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Ilha Solteira-SP. P. 102. 2013.

CARVALHO, S. R. **Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento.** Tese (doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG. p. 123. 2013.

SILVA, P. C. **Comparação de técnicas de problemas inversos em transferência de calor**. 2011. 123 f. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá - MG. 2011.

SOBRE O ORGANIZADOR

GILBERTO JOÃO PAVANI - Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1991), especialização em Análise de Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1994), licenciatura em Informática pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (1996), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Unisinos (2001), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2003) e doutorado em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (em andamento). Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS). Tem experiência em informática, engenharia mecânica, segurança do trabalho, materiais compósitos e poliméricos e participando dos grupos de pesquisa Programas Especiais em Saúde (IPA/RS) e Pesquisa em Polímeros Avançados (IFRS), além de ter publicado vários artigos científicos e livros na área de Engenharia Mecânica.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Alumínio 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14

Arduino 23, 24, 25, 27

C

Casco e tubo 9, 15

CFD - Computational Fluid Dynamics 9, 22

Confiabilidade 40

Corrosão 1, 2, 4, 5, 6, 7

E

Educação 23, 29, 68

F

Fresamento 53, 54, 57, 59, 67

I

Impedância 1, 4, 6, 7

M

Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM 40

MATLAB 53, 54, 65

Método direto 61, 62, 66

Método dos volumes finitos 21, 30, 32, 38

Modelos difusivos 30, 31, 35

O

OpenFOAM 9, 10, 13, 14, 21, 22

Otimização 30, 34, 36, 38

R

Robótica 23, 25

S

Saúde 23, 24, 25, 27, 29, 68

Simulação 10, 13, 15, 19, 21, 30, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 63, 65

Simulação numérica 21, 61

Solidificação 1, 2, 3, 5

Solução numérica 29, 30, 31, 32, 33, 34

T

Transferência de calor 9, 10, 12, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 39, 61, 62, 65, 66, 67

Trocador de calor 9

U

Usinagem 53, 54, 67

contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING 2

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING 2

Ano 2022